

Universitat de Lleida
Escola Politècnica Superior
Arquitectura Tècnica

Projecte final de carrera

COMPORTAMENT DE LA CALÇ EN TASQUES DE RESTAURACIÓ

Autora: Núria Gil i Polo
Director: Carles Labèrnia i Badia
Maig de 2011



ÍNDEX GENERAL

| | |
|---|-----------|
| 1. Agraïments | 11 |
| 2. Resum | 12 |
| 3. Abstract..... | 13 |
| 4. Introducció | 14 |
| 5. Paràmetres històrics..... | 15 |
| 5.1 Situació històrica de la calç | 15 |
| 5.2 Situació actual de la calç | 15 |
| 6. La calç com material de construcció | 17 |
| 6.1 Cicle i fabricació de la calç..... | 17 |
| 6.1.1 Extracció en canteres..... | 17 |
| 6.1.2 Trituració prèvia | 18 |
| 6.1.3 Calcinació..... | 18 |
| 6.1.3.1 Forns rudimentaris..... | 19 |
| 6.1.3.2 Forns tradicionals..... | 19 |
| 6.1.3.3 Forns rotatoris o horitzontals | 20 |
| 6.1.3.4 Forns verticals..... | 21 |
| 6.1.4 Apagat o hidratació de la calç..... | 22 |
| 6.1.4.1 Apagat a l'aire | 23 |
| 6.1.4.2 Apagat per aspersió | 23 |
| 6.1.4.3 Apagat per fusió o en bassa | 23 |
| 6.1.4.4 Apagat amb extintor "Tank" | 24 |
| 6.1.4.5 Apagat en hidratadors mecànics | 24 |
| 6.1.4.6 Hidratació en autoclau..... | 24 |
| 6.1.5 Fragat..... | 24 |
| 6.2 Tipus de calç..... | 25 |
| 6.2.1 Calç aèria | 26 |
| 6.2.1.1 Calç viva | 26 |
| 6.2.1.1.1 Calç càlcica o grassa..... | 26 |
| 6.2.1.1.2 Calç dolomítica o magra | 26 |
| 6.2.1.2 Calç hidratada | 26 |
| 6.2.2 Calç hidràulica..... | 27 |
| 6.3 Requisits principals de la calç per a construcció | 27 |
| 6.3.1 Requisits químics | 28 |
| 6.3.2 Requisits físics..... | 29 |
| 6.3.2.1 Altres propietats físiques de la calç viva i de la calç hidratada | 30 |



| | | |
|-----------|---|-----------|
| 6.3.3 | Requisits de durabilitat | 32 |
| 6.3.4 | Altres propietats a tenir en compte | 32 |
| 6.3.4.1 | Propietats tècniques | 32 |
| 6.3.4.2 | Propietats estètiques | 32 |
| 6.3.4.3 | Propietats ecològiques | 32 |
| 6.4 | Introducció als morters de calç | 32 |
| 6.4.1 | Origen i desenvolupament | 32 |
| 6.4.2 | Característiques generals | 33 |
| 6.4.3 | Components: Característiques principals | 34 |
| 6.4.3.1 | Aglomerants | 34 |
| 6.4.3.2 | Àrids | 35 |
| 6.4.3.3 | Additius | 35 |
| 6.4.3.4 | Addicions | 36 |
| 7. | Caracterització del morter de calç elaborat | 37 |
| 7.1 | Components del morter de calç elaborat | 37 |
| 7.1.1 | Aglomerant: Calç | 37 |
| 7.1.1.1 | Calç Pascual | 37 |
| 7.1.1.2 | Calç Pachs | 37 |
| 7.1.1.3 | Calç Saint-Astier | 38 |
| 7.1.1.4 | Calç BioCalce | 39 |
| 7.1.2 | Àrid: Arena | 40 |
| 7.1.2.1 | Arena natural silícica de Bellpuig | 40 |
| 7.1.2.1.1 | Granulometria | 40 |
| 7.1.2.1.2 | Equivalent d'arena | 40 |
| 7.1.2.1.3 | Densitat de partícules | 41 |
| 7.1.2.1.4 | Absorció d'aigua | 41 |
| 7.1.2.2 | Arena artificial de matxucat de roques calcàries d'Arbeca | 41 |
| 7.1.2.2.1 | Granulometria | 41 |
| 7.1.2.2.2 | Equivalent d'arena | 42 |
| 7.1.2.2.3 | Densitat de partícules i absorció d'aigua | 42 |
| 7.1.2.2.4 | Absorció d'aigua | 42 |
| 7.1.2.3 | Arena procedent del Pallars | 43 |
| 7.1.2.3.1 | Granulometria | 43 |
| 7.1.2.3.2 | Equivalent d'arena | 43 |
| 7.1.2.3.3 | Densitat de partícules i absorció d'aigua | 43 |
| 7.1.2.3.4 | Absorció d'aigua | 44 |



| | | |
|-----------|---|----|
| 7.1.2.4 | Arena procedent de la Vall d'Aran | 44 |
| 7.1.2.4.1 | Granulometria | 44 |
| 7.1.2.4.2 | Equivalent d'arena..... | 45 |
| 7.1.2.4.3 | Densitat de partícules i absorció d'aigua..... | 45 |
| 7.1.2.4.4 | Absorció d'aigua | 45 |
| 7.1.3 | Aigua..... | 45 |
| 7.2 | Fabricació de les provetes de morter de calç a estudiar | 46 |
| 7.2.1 | Preparació del morter | 46 |
| 7.2.1.1 | Dosificacions emprades pel morter de calç | 46 |
| 7.2.1.2 | Amassat del morter | 47 |
| 7.2.2 | Preparació de les provetes d'assaig..... | 48 |
| 7.2.2.1 | Mida de les provetes..... | 48 |
| 7.2.2.2 | Emmotllat de les provetes | 48 |
| 7.2.3 | Condicionament de les provetes | 49 |
| 7.2.3.1 | Manipulació i conservació abans de desemmotllar..... | 49 |
| 7.2.3.2 | Desemmotllat de les provetes | 49 |
| 7.2.3.3 | Edat de les provetes pels assajos de resistències mecàniques..... | 49 |
| 7.2.3.4 | Ambient del local d'emmagatzematge | 50 |
| 7.3 | Assajos | 50 |
| 7.3.1 | Densitat aparent | 50 |
| 7.3.1.1 | Aparells | 50 |
| 7.3.1.2 | Procediment de l'assaig | 51 |
| 7.3.1.3 | Resultats | 52 |
| 7.3.2 | Assajos físics. Resistència mecànica. Flexió i compressió..... | 52 |
| 7.3.2.1 | Aparells | 53 |
| 7.3.2.1.1 | Laboratori | 53 |
| 7.3.2.1.2 | Tamisos d'assaig | 53 |
| 7.3.2.1.3 | Amassadora | 53 |
| 7.3.2.1.4 | Motlles prismàtics | 55 |
| 7.3.2.1.5 | Compactadora | 57 |
| 7.3.2.1.6 | Màquina d'assaig per resistència a flexió..... | 57 |
| 7.3.2.1.7 | Màquina d'assaig per resistència a compressió | 59 |
| 7.3.2.2 | Procediment de l'assaig | 61 |
| 7.3.2.2.1 | Resistència a flexió | 61 |
| 7.3.2.2.2 | Resistència a compressió..... | 61 |
| 7.3.2.3 | Resultats | 61 |



| | | |
|-----------|---|-----------|
| 7.3.2.3.1 | Resistència a flexió | 62 |
| 7.3.2.3.2 | Resistència a compressió..... | 62 |
| 8. | Caracterització del formigó de calç elaborat..... | 63 |
| 8.1 | Components del formigó de calç elaborat..... | 63 |
| 8.1.1 | Aglomerant: Calç | 63 |
| 8.1.1.1 | Cal Pascual | 63 |
| 8.1.1.2 | Calç Pachs | 63 |
| 8.1.1.3 | Chaux Saint-Astier..... | 64 |
| 8.1.2 | Àrids: Grava i Terra | 65 |
| 8.1.2.1 | Grava..... | 65 |
| 8.1.2.2 | Terra..... | 65 |
| 8.1.3 | Aigua..... | 66 |
| 8.2 | Fabricació de les provetes de formigó de calç a estudiar | 66 |
| 8.2.1 | Preparació del formigó | 66 |
| 8.2.1.1 | Dosificacions emprades pel formigó de calç..... | 66 |
| 8.2.1.2 | Amassat del formigó | 67 |
| 8.2.2 | Preparació de les provetes d'assaig..... | 68 |
| 8.2.2.1 | Mides de les provetes | 68 |
| 8.2.2.1.1 | Mides provetes cúbiques..... | 68 |
| 8.2.2.1.2 | Mides provetes cilíndriques | 69 |
| 8.2.2.2 | Emmotllat de les provetes | 70 |
| 8.2.2.2.1 | Motlles cúbics..... | 70 |
| 8.2.2.2.2 | Motlles cilíndrics..... | 72 |
| 8.2.3 | Condicionament de les provetes | 73 |
| 8.2.3.1 | Desemmotllat de les provetes | 73 |
| 8.2.3.2 | Edat de les provetes pels assajos de resistències mecàniques..... | 73 |
| 8.2.3.3 | Ambient del local d'emmagatzematge | 74 |
| 8.3 | Assajos | 74 |
| 8.3.1 | Assaig de consistència | 74 |
| 8.3.1.1 | Aparells | 75 |
| 8.3.1.2 | Procediment de l'assaig | 75 |
| 8.3.1.3 | Resultats | 76 |
| 8.3.2 | Assajos físics. Resistència mecànica. Compressió | 79 |
| 8.3.2.1 | Aparells | 79 |
| 8.3.2.2 | Procediment de l'assaig | 80 |
| 9. | Resultats obtinguts, anàlisi i discussió | 84 |
| 9.1 | Calç Pascual..... | 84 |



| | | |
|------------|---|------------|
| 9.1.1 | Mortor de calç Pascual | 84 |
| 9.1.2 | Formigó de calç Pascual..... | 87 |
| 9.1.2.1 | Calç Pascual amb grava..... | 87 |
| 9.1.2.2 | Cal Pascual amb terra | 88 |
| 9.2 | Calç Pachs..... | 89 |
| 9.2.1 | Mortor de calç Pachs | 89 |
| 9.2.2 | Formigó de calç Pachs | 91 |
| 9.2.2.1 | Calç Pachs amb grava..... | 91 |
| 9.2.2.2 | Calç Pachs amb terra | 92 |
| 9.3 | Calç Saint-Astier | 93 |
| 9.3.1 | Mortor de calç Saint-Astier | 93 |
| 9.3.2 | Formigó de calç Saint-Astier | 96 |
| 9.3.2.1 | Calç Saint-Astier amb grava | 96 |
| 9.3.2.2 | Calç Saint-Astier amb terra | 97 |
| 9.4 | Calce Biocalce..... | 98 |
| 9.4.1 | Mortor de calç Biocalce | 98 |
| 9.5 | Discussió dels resultats | 100 |
| 9.5.1 | Comparatiu de mortor de calç..... | 100 |
| 9.5.2 | Comparatiu de formigó de calç | 103 |
| 10. | Conclusions | 110 |
| 11. | Referències bibliogràfiques | 112 |
| 11.1 | General..... | 112 |
| 11.2 | Normativa | 112 |
| 11.3 | Recursos informàtics..... | 113 |
| 12. | ÀNNEX 1..... | 114 |
| 12.1 | Fitxa tècnica: Calç Pascual..... | 114 |
| 13. | ÀNNEX 2..... | 115 |
| 13.1 | Fitxa tècnica: Calç Pachs | 115 |
| 14. | ÀNNEX 3..... | 116 |
| 14.1 | Fitxa tècnica: Caux Saint Astier | 116 |
| 15. | ÀNNEX 4..... | 117 |
| 15.1 | Fitxa tècnica: BioCalce | 117 |
| 16. | ÀNNEX 5..... | 118 |
| 16.1 | Fitxa tècnica: Arena natural silícica de Bellpuig..... | 118 |
| 17. | ÀNNEX 6..... | 119 |
| 17.1 | Fitxa tècnica: Arena artificial de matxucat de roques calcàries d'Arbeca..... | 119 |
| 18. | ÀNNEX 7..... | 120 |



| | | |
|------------|---|------------|
| 18.1 | Fitxa tècnica: Arena procedent del Pallars..... | 120 |
| 19. | ÀNNEX 8..... | 121 |
| 19.1 | Fitxa tècnica: Arena procedent de la Vall d'Aran..... | 121 |



ÍNDEX TAULES

| | |
|--|----|
| Taula 1: Producció de calç al 2006 | 15 |
| Taula 2: Cicle de fabricació de la calç | 17 |
| Taula 3: Designació de la calç | 28 |
| Taula 4: Requisits químics per la calç | 29 |
| Taula 5: Resistència a compressió de les calçs hidràuliques i de les hidràuliques naturals | 30 |
| Taula 6: Requisits físics per la calç viva | 30 |
| Taula 7: Requisits físics per la calç hidràulica i hidràulica natural ^g | 31 |
| Taula 8: Característiques del morter fresc i endurit..... | 34 |
| Taula 9: Tipus d'àrids..... | 35 |
| Taula 10: Taula de l'estalvi de CO ₂ en la utilització de NHL de Saint-Astier | 39 |
| Taula 11: Taula densitats de l'arena silícica de Bellpuig..... | 41 |
| Taula 12: Taula absorció d'aigua de l'arena silícica de Bellpuig | 41 |
| Taula 13: Taula densitats de l'arena calcària d'Arbeca | 42 |
| Taula 14: Taula absorció d'aigua de l'arena calcària d'Arbeca..... | 42 |
| Taula 15: Taula densitats de l'arena procedent del Pallars..... | 44 |
| Taula 16: Taula absorció d'aigua de l'arena procedent del Pallars | 44 |
| Taula 17: Taula densitats de l'arena procedent de la Vall d'Aran | 45 |
| Taula 18: Taula absorció d'aigua de l'arena procedent de la Vall d'Aran | 45 |
| Taula 19: Taula dosificació calç Pascual | 46 |
| Taula 20: Taula dosificació calç Saint-Astier | 46 |
| Taula 21: Taula dosificació calç Pachs | 46 |
| Taula 22: Taula dosificació calç Biocalce | 47 |
| Taula 23: Dimensions de l'aparell per determinar la densitat aparent..... | 51 |
| Taula 24: Resultats de l'assaig de densitat aparent | 52 |
| Taula 25: Llum dels tamissos d'assaig | 53 |
| Taula 26: Velocitats de la pala mescladora | 54 |
| Taula 27: Taula de l'estalvi de CO ₂ en la utilització de NHL de Saint-Astier | 65 |
| Taula 28: Taula dosificació formigó calç Pascual..... | 66 |
| Taula 29: Taula dosificació formigó calç Pachs..... | 66 |
| Taula 30: Taula dosificació formigó calç Saint-Astier | 67 |
| Taula 31: Consistència segons assentament del con d'Abrams | 77 |



ÍNDEX IL·LUSTRACIONS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Forn tradicional | 19 |
| Figura 2: Forn rotatori o horitzontal..... | 20 |
| Figura 3: Forn vertical i forn vertical segons Jacques Claude | 21 |
| Figura 4: Forn de corrent paral·lela i forn de corrent paral·lela segons Jacques Claude | 21 |
| Figura 5: Procés de fabricació de la calç..... | 25 |
| Figura 6: Classificació de la calç segons les seves característiques químiques | 29 |
| Figura 7: Arena natural silícica de Bellpuig..... | 40 |
| Figura 8: Granulometria arena silícica de Bellpuig | 40 |
| Figura 9: Arena artificial de matxucat de roques calcàries..... | 41 |
| Figura 10: Granulometria arena calcària d'Arbeca..... | 42 |
| Figura 11: Arena procedent del Pallars | 43 |
| Figura 12: Granulometria arena procedent del Pallars | 43 |
| Figura 13: Arena procedent de la Vall d'Aran..... | 44 |
| Figura 14: Granulometria arena procedent de la Vall d'Aran | 45 |
| Figura 15: Preparació del amassat del morter | 47 |
| Figura 16: Procediment d'emmotllat de les provetes prismàtiques | 48 |
| Figura 17: Desemmotllat de les provetes prismàtiques..... | 49 |
| Figura 18: Aparell per determinar la densitat aparent..... | 51 |
| Figura 19: Recipient i pala tipus | 54 |
| Figura 20: Recipient i pala emprada..... | 54 |
| Figura 21: Exemple de motlle típic..... | 55 |
| Figura 22: Motlle emprat..... | 55 |
| Figura 23: Exemple d'espàtula i de regle metàl·lic plà típic | 57 |
| Figura 24: Dispositiu de càrrega per la determinació de la resistència a flexió | 58 |
| Figura 25: Màquina d'assaig emprada per l'assaig de resistència a flexió | 58 |
| Figura 26: Exemple de dispositiu típic per assajos de resistència a compressió..... | 60 |
| Figura 27: Màquina d'assaig emprada per l'assaig de resistència a compressió | 60 |
| Figura 28: Pantalla d'ordinador amb els resultats obtinguts en un assaig..... | 61 |
| Figura 29: Amassat manual del formigó amb terra..... | 67 |
| Figura 30: Dimensions nominals de proveta cúbica..... | 68 |
| Figura 31: Provetes cúbiques estudiades | 69 |
| Figura 32: Dimensions nominals de proveta cilíndrica..... | 69 |
| Figura 33: Provetes cilíndriques estudiades | 70 |
| Figura 34: Procediment d'emmotllat de les provetes cilíndriques..... | 70 |
| Figura 35: Provetes 15x15x15 | 71 |



| | |
|--|----|
| Figura 36: Provetes 20x20x20 | 71 |
| Figura 37: Motlle de cautxú..... | 71 |
| Figura 38: Motlle d'acer | 71 |
| Figura 39: Provetes diàmetre 15 | 72 |
| Figura 40: Motlle d'acer | 72 |
| Figura 41: Desemmotllat de provetes cúbiques i cilíndriques..... | 73 |
| Figura 42: Aparell emprat pel mètode del con d'Abrams | 74 |
| Figura 43: Formes d'assentament | 77 |
| Figura 44: Mesura de l'assentament | 77 |
| Figura 45: Mesura de l'assentament de la mostra | 78 |
| Figura 46: Mostres del formigó elaborat amb calç..... | 78 |
| Figura 47: Màquina d'assaig emprada per l'assaig de resistència a compressió | 80 |
| Figura 48: Màquina compactadora emprada per la realització de les provetes | 81 |
| Figura 49: Ruptures satisfactòries en provetes cúbiques..... | 82 |
| Figura 50: Ruptures no satisfactòries en provetes cúbiques..... | 82 |
| Figura 51: Ruptures satisfactòries en provetes cilíndriques..... | 83 |
| Figura 52: Ruptures no satisfactòries en provetes cilíndriques..... | 83 |
| Figura 53: Ruptura satisfactòria en proveta cúbica i cilíndrica assajada | 83 |



1. AGRAÏMENTS

A totes les persones que m'han ajudat d'una manera o d'altra els voldria agrair tot el temps emprat en recolzar-me i l'ajuda aportada.

En primer lloc al meu tutor, Carles Labèrnia i Badia, per totes les estones d'explicacions i repeticions de les mateixes. La tasca del laboratori, emprat al Consorci Lleidatà de Control, ha estat una de les més importants, de les que ha necessitat més temps, i per aquesta raó l'ajuda de la Montserrat Balcells, principalment, ha estat molt important.

El projecte mostra dos tipus de provetes, unes de morter i la resta de formigó. Aquestes últimes van estar realitzades amb el Manel Consola i el Jordi Moragues que em van ajudar tant en explicar les raons de les millores del terreny com en la realització de les provetes, que van ser un gran nombre.

I també voldria agrair a la Sogues Gabernet, de Prefabricats Pujol de Mollerussa, per tota l'ajuda amb els àrids escollits i tota la informació facilitada.

Moltes gràcies a tots.



2. RESUM

La calç és un material emprat com a aglomerant des de fa temps. Actualment no és un material gaire utilitzat, a diferència d'altres com el ciment ja que aporta gran resistència. De qualsevol manera, s'ha de tenir en compte la seva utilització en alguns casos com en la restauració si tenim en compte que antigament era l'aglomerant emprat. Per tant, si és necessària una actuació en patrimoni antic on s'havia emprat aquest tipus de material s'ha de fer amb el mateix material d'una manera similar per tal de poder aportar les característiques originals.

Per tal de dur a terme aquests processos, cal estudiar detingudament els elements que formen aquest morter o formigó de calç i realitzar un estudi de les propietats que ens aporta. Aquest projecte d'investigació realitza aquest estudi detingudament fabricant provetes de morter i formigó de calç amb quatre tipus de calç i quatre tipus d'àrid, pel que fa al morter, i tres tipus de calç i dos tipus d'àrid, pel que fa al formigó. Els assajos de resistència tant a flexió com a compressió han estat a 7, 28, 56 i 90 dies, entre totes les provetes. Una vegada assajades i analitzant, discutint i comparant les característiques de tots els elements que les formen s'han tret les conclusions descrites al corresponent apartat.



3. ABSTRACT

Lime is a material that has been used as a binder for a long time. Currently this is a material which use is not very common, as cement is already a material that provides high strength. Either way, you should consider its use in some cases such as restoration, as the lime was the binder once used, in ancient times. Therefore, if an action is necessary in ancient heritage where had been used such material, this intervention must be done with the same material using a similar procedure in order to provide and keep the original features.

To perform these procedures, we must study carefully the elements that make this concrete or mortar of lime and a study of the properties that gives us must be done. This research project carried out evaluates carefully this study manufacturing mortar and concrete specimens with four types of lime and lime with four types of aggregates, according to the mortar, and three types of lime and two types of aggregates, according to the concrete. The tests that have been done of resistance to both bending and compression were 7, 28, 56 and 90 days, among all specimens. Once tested and analyzing, discussing and comparing the characteristics of the elements composing all the specimens, all the conclusions and results were described in the correspondent section.



4. INTRODUCCIÓ

Aquest projecte d'investigació consta d'un detallat estudi de les característiques del morter i del formigó de calç a partir de la seva fabricació per diferents mitjans i amb diversos materials que seran comparats, per aplicar en la restauració de patrimoni.

El morter de calç és un factor important per la preservació de les estructures del patrimoni, i en aquest cas el morter de calç emprat es basa en calç hidràulica o aèria, arena i aigua, sense cap tipus d'additiu. No es caracteritza per la seva gran duresa a curt termini, sinó per la seva plasticitat, color i facilitat d'aplicació. Anomenem morter a una barreja d'un aglomerant, un àrid i aigua, que s'aplica en forma de pasta per a que, una vegada endurit, uneixi dos materials constructius o constitueixi una capa continua a mode de revestiment. El factor més important a tenir en compte és la compatibilitat de tots dos morters, existent i nou, una vegada aplicat i sense implicar la substitució de l'actual.

El formigó de calç, ha estat estudiat en dues vessants; per una banda aplicant la calç amb grava comercial com si es tractés d'un formigó amb ciment, i per una altra banda, s'ha aplicat la calç amb terra i grava no comercial. Aquestes dues vessants es podran comparar per saber amb quina reacciona millor la calç i de quina manera és la seva reacció.

L'estudi pretén caracteritzar morters de calç Pascual, Pachs, Saint-Astier i BioCalce, amb diferents tipus d'arenes com arena calcària, sílica, de la Ribagorça i de la Val d'Aran. Tanmateix, es caracteritza el formigó amb calç Pascual, Pachs i Saint-Astier, emprant grava i terra, seguint així les dues metodologies.

La caracterització té com a objectiu definir el comportament dels morters i formigons de calç davant la seva utilització en obres i actuacions de restauració, protecció o rehabilitació del patrimoni arquitectònic.

Com a finalitat última, s'establirà un procediment estudiat, contrastat i documentat d'aquest comportament al ser emprat com aglomerant per a morters (reomplir espais entre carreus, remunes de filades de protecció de murs de jaciments, reconstrucció genèrica, revestiments de protecció de carreus degradats, refets de revestiment...) i formigons (reforç de bases de murs, refer o reforçar fonaments degradats, consolidacions que requereixin incorporació de massa...).

Per tal d'arribar a unes conclusions finals, s'han realitzat els assajos marcats per les normatives UNE-EN pertinents, descrites en els corresponents apartats de dit projecte. Ha estat necessari seguir el procediment indicat a dita normativa per tal d'obtenir resultats que es puguin comparar entre morters o formigons de característiques iguals.



5. PARÀMETRES HISTÒRICS

5.1 Situació històrica de la calç

L'ús de la calç ja sigui com calç viva o calç hidratada, és un fet prehistòric que va aparèixer després del descobriment del foc. La utilització de les pedres calcàries, per part de l'home primitiu per fer foc, li va permetre observar que aquestes pedres es desintegraven en trossos blancs i que posteriorment a la pluja, formava una pasta blanca que s'enduria amb l'aire.

La calç ja era coneguda com material de construcció per morters i revestiments ja que en el sisè mil·lenni adC es va trobar a Çatal Hüyük, Messopotàmia, a Àsia Menor, parets revocades en fresc i armades amb morters de calç.

És doncs, fins la revolució industrial i el descobriment del ciment al 1824, a Portland, Anglaterra, que la calç ha estat el principal aglomerant de la construcció ja sigui en morters, revestiments, com en pintures.

Els constructors en aquella època aplicaven les calçs disponibles de les canteres més pròximes, molt extenses arreu del món i suposant el 20%. És a dir, la qualitat de la calç variava segons la roca d'extracció, doncs de les calcàries més pures, procedien de les calçs grasses o magres segons la concentració d'argila, és a dir, la calç aèria; i de les calcàries més argiloses, les més riques en sílice, procedia la calç hidràulica.

5.2 Situació actual de la calç

La fabricació de la calç es situa dins el grup de les indústries dedicades a la fabricació de productes minerals no metàl·lics. En elles, l'energia suposa una gran repercussió en els costos de fabricació i en el cas de la producció de la calç comprèn entre el 40% i el 50% dels costos totals de fabricació.

A l'any 2006 la producció de calç en totes les seves tipologies va ser de 2.560.000 t. La xifra de producció de calç ha estat subministrada al mercat de la següent manera:

| | |
|--|-------------|
| Calç viva o Òxid de calci (CaO) | 1.684.480 t |
| Calç hidratada o apagada Hidròxid de calci (Ca(OH)₂) | 506.880 t |
| Dolomia calcinada | 368.640 t |

Taula 1: Producció de calç al 2006

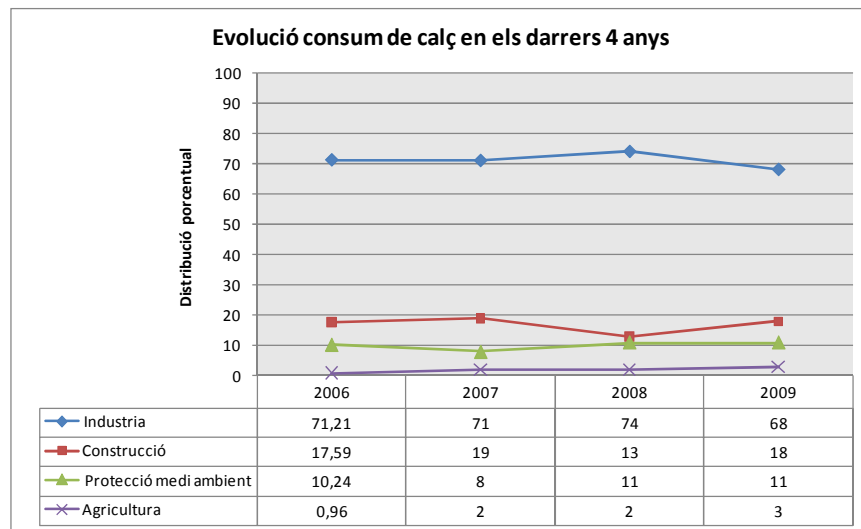
*Dades obtingudes segons la Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España.

Els tipus de calç produïdes a Espanya, principalment, estan classificades com calç aèries, aquelles que endureixen amb el diòxid de carboni que es troba a l'aire i no amb l'aigua, i exigeixen una

matèria prima d'alta puresa, superior al 95% en carbonat càlcic per les calçs vives i en carbonat càlcic-magnèsic. Tot i així, també es troben produccions de calç hidràulica.

Actualment, la necessitat de rehabilitació i restauració d'obres monumentals antigues ha suposat el renaixement dels morters a base de calç.

Els usos de la calç àeria a nivell estatal es pot classificar de la manera següent:



*Dades obtingudes segons la Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España.

6. LA CALÇ COM MATERIAL DE CONSTRUCCIÓ

6.1 Cicle i fabricació de la calç

Es pot definir la calç com, aquell producte, sigui quina sigui la seva composició i aspecte físic, que procedeixi de la calcinació de pedres calcàries.

La fabricació de calç, doncs, comprèn dos principals processos químics: la calcinació i la hidratació. En aquests processos van associats les operacions de transport, trituració i polvorització de la calcària a més de la separació per aire i l'emmagatzematge adient de la calç obtinguda per evitar processos de fraguat.

| | |
|---|------------------------------|
| $\text{CaCO}_3 + \text{calor} = \text{CaO} + \text{CO}_2$ <p><i>Carbonat càlcic Òxid de calci Diòxid de carboni</i></p> | Calcinació |
| $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca(OH)}_2$ <p><i>Òxid de calci Aigua Hidròxid de calci</i></p> | Apagat o Hidratació |
| $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ <p><i>Hidròxid de calci Diòxid de carboni Carbonat càlcic Aigua</i></p> | Carbonatació o Fragat |

Taula 2: Cicle de fabricació de la calç

De qualsevol manera, és necessari uns passos previs als principals, com són: l'extracció en canteres i la trituració prèvia de la calç.

6.1.1 Extracció en canteres

Moltes vegades és més determinant la distància en que es troba el combustible que la pròpia matèria prima, degut a que aquesta es transporta amb un menor nombre de viatges.

S'acostuma a extreure la matèria prima a cel obert per mitjà de forats a les roques, anomenats barrines, pel qual s'emprava una broca que es colpejava amb una maça. A continuació s'introduïa la pólvora i es compactava l'explosiu i per últim es tapava amb paper i teula recalcada. Per altra banda, també era habitual arrencar pedres manualment per mitjà de piquetes.

Actualment, les explotacions de calç es realitzen a cel obert, realitzant l'extracció per mitjà d'explosius i màquines excavadores. També és habitual l'ús de desapropitaments de canteres de pedra calcària i marbre.

Una vegada obtingudes les pedres es transportava on es situava el forn utilitzant carretons o, en el cas que l'extracció es localitzés en una alçada superior al forn, es deixava rodar fins aquell punt.



6.1.2 Trituració prèvia

El pas previ a la calcinació és la trituració, degut a que la transmissió del calor està en funció de la superfície de contacte, i per tant, la pedra calcària que s'introdueix al forn ha de tenir una mida adient.

Si la mida és excessivament gran es necessària una major quantitat d'energia suposant despeses elevades de combustible, a més de no obtenir una calcinació perfecta del nucli de les pedres i obligant que la cocció duri temps excessiu.

Per contra, si la mida és massa petita, la pedra calcària no deixa espai suficient per a produir-se una tirada adient i es pot formar una abundància de gasos en l'interior del forn, originant la reversió de la reacció química i d'aquesta manera, no obtenir el producte desitjat.

Una vegada obtinguda la pedra per qualsevol de les metodologies anteriorment descrites, cal reduir la seva mida manualment. Actualment, en la fabricació industrialitzada, la trituració es realitza amb matxucadores de mandíbules on es redueix la pedra a una mida entre 80 i 100 mm, denominat com a *matxucat primer*.

Posteriorment, el material matxucat passa a les instal·lacions de classificació on es classifica segons la mida en funció del forn emprat. En els forns verticals, la mida d'emmagatzematge de la pedra calcària ha de ser entre 80 i 20 mm, i en els últims tipus de forns verticals actuals entre 30 i 10 mm. En el cas de forns horitzontals, les mides són entre 40 i 5 mm.

6.1.3 Calcinació

El procés s'inicia amb la calcinació, deshidratació o cocció de la pedra calcària (CaCO_3) a 900°. Durant aquest procés, el carbonat càlcic (CaCO_3) present en la pedra es transforma en òxid de calci o cal viva (CaO), al dissociar-se el diòxid de carboni (CO_2) que va a l'atmosfera.

En els sistemes tradicionals, un dels problemes de la calcinació era l'obtenció del combustible. Aquest, normalment, era vegetal o mineral i havia d'estar sec i en el transport havia d'estar protegit. Actualment, els combustibles emprats són el gas natural o el gas-oil.

En el procés de calcinació es poden utilitzar diferents tipus de forns, com: forns rudimentaris, forns tradicionals, forns rotatoris o horitzontals i forns verticals. Aquests dos últims són els més emprats actualment.

De qualsevol manera, la calcària que s'introdueix en aquests forns no pot ser qualsevol:

- No pot ser molt porosa o molt humida degut a que això augmentaria la demanda de combustible.
- No ha de tenir impureses del tipus partícules de sílice degut a que aquesta, reacciona amb el CaO formant silicats, els qual s'acumulen al fons dels forns, obstruint el pas del material.

6.1.3.1 Forns rudimentaris

Consistien en un conjunt de capes alternades de pedra, calcària i carbó. La superfície exterior es recobria amb fang i terra. Al centre es formava, amb pedres grosses, un espai obert per un costat on es cremava la llenya.

Tot i que el procés és senzill, la qualitat de la calç obtinguda no era molt bona, degut a això era un sistema no gaire utilitzat.

6.1.3.2 Forns tradicionals

Aquest tipus de forns estaven formats per una estructura fixa ja sigui de paret amb pedra calcària o fins i tot un forat excavat on es realitzaria el forn, aprofitant les parets de l'excavació i en cas de ser parets molt poroses se li aplicava fang per conservar, millor i durant més temps, el calor. Es deixava únicament al descobert la part frontal de la base on es situava la porta rectangular, que deixava entrar l'aire necessari.

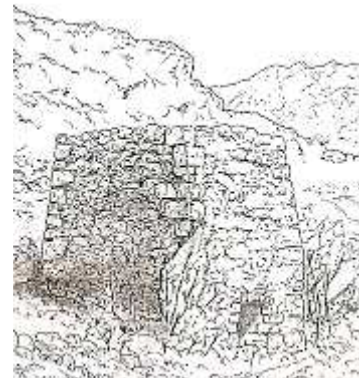


Figura 1: Forn tradicional

*Imatge presa del llibre "Guia practica de la cal y el estuco"

El forn consta d'una paret circular i en forma de con truncat amb un diàmetre entre 1 i 1,70 metres en la seva part superior i d'alçada entre 1,5 i 3 metres.

S'introduïa la llenya a la caldera, situada en l'espai entre el terra del forn i la cartel·la, per la porta, formant un entramat per recolzar la pedra. Es formaven, amb blocs de pedra calcària, una volta amb la pedra a courer. I una vegada acabada la volta es tancava amb una pedra gran a mode de cunya i es col·locaven a sobre la resta de pedres que eren cada cop més grans (fins 10-12 kg).

Una vegada construïda l'estructura del forn i la situació de les pedres, s'aplicava foc inicialment no molt fort per tal de que les pedres s'uneixin. Una vegada unides, el foc es podia intensificar, però sempre d'una manera uniforme per poder coure la pedra correctament.

En un principi el fum és fosc i es va emblanquant a mesura que la pedra es cou. En el moment que es torna blanc indica que la cocció ha acabat.

La pluja no suposava cap tipus de problema ja que l'aigua s'evaporava pel calor que es despenia abans d'arribar a l'interior del forn.

Per contra, el vent si influïa, tant en la durada com en la intensitat. Si l'aire entrava per la part superior i sortia per la inferior, revocava el foc cap a l'exterior produint una desigual cocció entre el material i perdent calories.

Tanmateix, si dins del forn quedava metall o queia accidentalment, el foc no coïa la calç, quedant aquesta totalment crua i obtenint-la de mol mala qualitat.

Un cop estava cuita la calç es tancava la porta, sense permetre l'entrada d'aire fred ja que podria ocasionar la fractura de les parets. Es deixava refredar en l'interior del forn tancat dos o tres dies.

6.1.3.3 Forns rotatoris o horitzontals

Consisteixen en cilindres d'acer, recolzats en anelles que roden sobre rodets, tot del mateix material. Les longituds aquests forns varien de 30 a 100 metres i els seus diàmetres entre 2 i 5 metres. El tub es troba revestit de maó refractari. Els forns rotatius, són emprats generalment per calcinar una calcària amb una mida petita de partícula entre 6 i 60 mm.

Aquests, estan equipats per escalfadors previs i refrigerants, estan millor equipats per l'obtenció d'una calç hidratada degut a la seva instrumentació, produint una quantitat màxima de calç per la relació home/hora fins a 1000T/dia i, el seu gran desavantatge és el seu alt consum de combustible.

Aquest procediment produeix el 10% d'òxid total en l'actualitat.

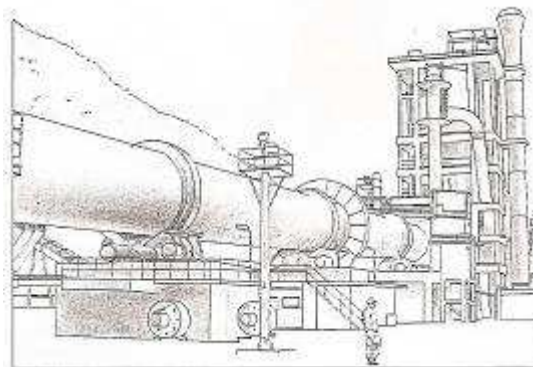


Figura 2: Forn rotatori o horitzontal

*Imatge presa del llibre "Guia practica de la cal y el estuco"

6.1.3.4 Forns verticals

Aquests forns es constitueixen generalment per un cilindre d'acer revestit, podent tenir diversos cremadors perifèrics que injecten al forn gasos calents procedents de la combustió de combustibles líquids o gasosos, essent energèticament intensiu. El combustible preferent és el gas natural pel seu poder calorífic i la manca de sofre. Actualment tenen mecanismes de càrrega automàtics que es situen a prop de les matxucadores i transportant la pedra mitjançant cintes transportadores a la part superior del forn, on injecten aire en la seva base per la combustió. El seu rendiment és major que el del forn rotatiu o horitzontal. Després de la calcinació, i una vegada refredada la calç, es classifica segons les mides i es redueixen emmagatzemant-se en sitges.

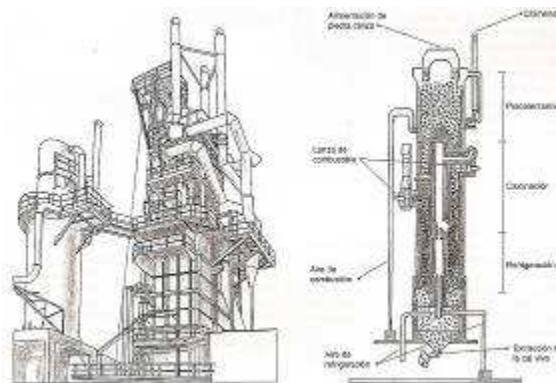


Figura 3: Forn vertical i forn vertical segons Jacques Claude

*Imatge presa del llibre "Guia practica de la cal y el estuco"

El material obtingut seguint aquest procediment és de gran qualitat i és el sistema que avui en dia acostuma a ser habitual en la fabricació de la calç, essent el 90% de la producció.

Es troben altres forns amb un esquema de funcionament igual, però amb major producció i estalvi energètic que són els forns de corrent paral·lels. Aquests consisteixen en dos tonells verticals junts que treballen alternativament.

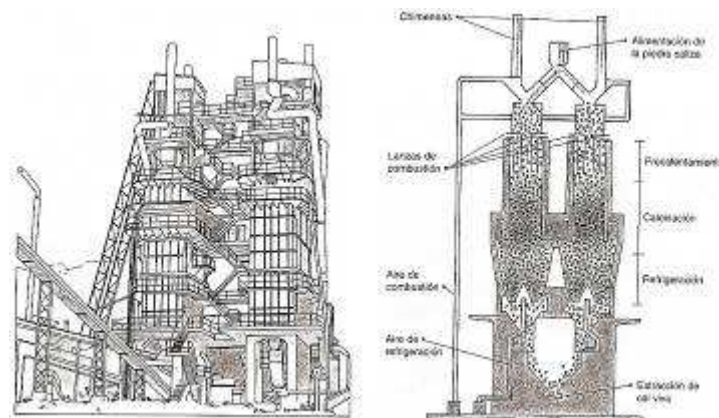


Figura 4: Forn de corrent paral·lela i forn de corrent paral·lela segons Jacques Claude

*Imatge presa del llibre "Guia practica de la cal y el estuco"



Moltes de les propietats de la calç depenen de la qualitat de la calcària emprada com també en el procés de calcinació, i d'aquestes propietats, depenen els usos que es doni a la calç. D'aquesta manera es poden esmentar les propietats com:

- La duresa de la calç obtinguda, depèn de les impureses de la calcària emprada com també de la temperatura de calcinació. Una impura donaria una calç dura si es calcina a temperatures elevades.
- La porositat, i com a conseqüència de la densitat, de les calçs també depèn de la temperatura de calcinació, a major temperatura menor porositat i per tant, major densitat. Com a conseqüència d'això, a major temperatura, la calç va perdent activitat química, i per aquesta raó cal sintetitzar la calç a temperatures el més pròximes a la temperatura de dissociació de la calcària.
- Les calcàries que contenen entre un 15-30% de matèria argilosa produeix calçs altament hidràuliques.

6.1.4 Apagat o hidratació de la calç

Serà necessària la hidratació de la calç viva per ésser emprada en construcció. L'aigua és l'encarregada d'inflar els tonells i la transforma en una pasta blanca o pols blanc sec, segons la quantitat d'aigua que s'hagi aportat.

El procés químic consisteix en aportar aigua al òxid de calci o calç viva aconseguint hidròxid de calci o calç apagada (Ca(OH)_2), convertint-se en un alcalí que disminueix el valor del pH. El morter de calç confeccionat en humit s'obté afegint a la pasta blanca, sorra i aigua, a més de pigments d'una manera optativa. En aquest procés es produeix un gran augment de volum de la calç juntament amb una important pèrdua de calor.

La calç dependrà d'un seguit de factors segons la velocitat amb la que s'hidrati, com són:

- Les condicions físiques de la calç viva, ja que amb una mida petita i major porositat, la hidratació serà més ràpida.
- La composició química de la calç viva: a calç més pura la velocitat serà major, en canvi, a major contingut de magnesi serà més lenta.
- La temperatura amb la que s'ha calcinat la pedra calcària també influirà.

És important la durada de la hidratació ja que antigament es recomanava durades de tres anys, ja que influeix en l'estructura cristal·lina de l'hidròxid resultant, produint calç de major untuositat i plasticitat a major temps d'hidratació.



El apagat, doncs, es pot duu a terme per diferents sistemes, com: apagat a l'aire, apagat per aspersió, apagat per fusió, apagat amb extintor "Tank", apagat en hidratadors mecànics i apagat en autoclau.

6.1.4.1 Apagat a l'aire

En aquest procediment, la calç s'exposa a l'aire i, pel seu efecte, a la humitat que hi ha, produint una hidratació lenta reduint-se a pols per l'efecte de l'augment de volum.

Donada la lentitud del procés i que segueix absorbint CO_2 de l'ambient i produint el fraguat per aquest efecte, la seva utilització es redueix a l'ús en conservació, essent una capa de protecció.

6.1.4.2 Apagat per aspersió

Aquest tipus d'hidratació per aspersió permet realitzar-se en dues tipologies diferents, com són:

1. Es disposa la calç en una superfície neta i es rega amb aigua, amb una relació entre el 25% i 40% del pes de la calç. En el moment que es generin els tarrons es recobreix amb arena per tal de reduir la velocitat de la hidratació i el contacte amb l'aire.
2. Es disposa calç viva en capes superposades de petit gruix i s'humitegen amb molta aigua: la primera capa amb bastant aigua per tal que ella mateixa es torni pols a causa de l'efecte de la hidratació, després la calor necessària per evaporar l'aigua que sobra, i la quantitat restant començarà a hidratar la capa superior de calç viva. Aquesta capa s'humitejarà en menor quantitat i així progressivament fins arribar a la humitat necessària per aconseguir la hidratació perfecta en tota la calç i reduir la pols generada per l'augment de volum.

6.1.4.3 Apagat per fusió o en bassa

Aquest sistema d'hidratació també es pot anomenar per immersió. Tenint en compte el volum de calç que sigui necessari hidratar es pot realitzar de diverses maneres:

1. La calç en tarrons es col·loca dins de cistelles de vímet i es submergeix en aigua el temps necessari fins que deixin d'aparèixer bombolles d'aire. Aquesta calç s'apila i s'aplica una capa de 20 cm d'arena per conservar la calor produïda. S'aconsella que es mantingui en aquest estat durant dos dies i finalment es passa per un tamís.
2. En una excavació en el terreny s'aplica la calç viva amb aigua. Si s'afegeix una quantitat menor d'aigua a la necessària provoca una temperatura massa elevada originant una cocció superior. La inundació s'origina per una elevada quantitat d'aigua que retarda la hidratació per mantindre la temperatura massa baixa.

Aquest sistema s'utilitza en obra quan s'hidrata abans d'utilitzar-se, tot i que cal deixar-la reposar durant vuit dies com a mínim.

3. Aquesta teoria clàssica és originària de Vitruvi i és un procés que acostuma a durar tot un dia. S'aboca calç viva en un recipient cilíndric, fabricat amb fàbrica i arrebossat, i aigua en l'ordre de



dos a tres vegades el volum de la calç, i s'espera fins que deixa de sortir bombolles d'aire. Seguidament, es buida i es fa passar per un tamís fins ocupar la part inferior de la bassa. D'aquesta manera, protegida del CO_2 es manté durant dos anys.

6.1.4.4 Apagat amb extintor "Tank"

Va ser construït per M. Ch. Candlot i permet la hidratació tant de calç grassa (aèria) com hidràulica.

Aquest sistema està basat en el principi que per obtenir una bona hidratació cal:

- Mullar la calç de tal manera que tots els trossos rebin la mateixa quantitat d'aigua.
- Mantenir la calç humida en un medi tancat per evitar la pèrdua de calor.

L'extintor automàtic Tank es caracteritza per una tremuja giratòria flotant que rep per la part superior aigua i calç, al mateix temps.

6.1.4.5 Apagat en hidratadors mecànics

És el procediment actual en les fàbriques de producció de calç apagada. Es fa passar la calç viva, prèviament triturada, per una cambra on es troben disposats els dispensadors d'aigua, permetent controlar perfectament la quantitat d'aigua emprada.

El resultat obtingut en sec és d'una mida molt petita de l'ordre de la micra.

6.1.4.6 Hidratació en autoclau

L'autoclau és un aparell que consisteix en un recipient metàl·lic de parets gruixudes i una comporta amb un gran aspersor units de manera que pugui suportar la enorme pressió que es produirà en el seu interior. Una vegada tancat l'autoclau, amb la calç viva dins, s'injecta vapor d'aigua a pressió produint una hidratació ràpida i perfectament controlada, obtenint calç apagada de gran qualitat.

Aquest mètode s'utilitza principalment a Amèrica del Nord i s'aconsella per la hidratació de les calçs dolomítiques o magres obtenint una hidratació total i en un temps reduït. En aquest cas, la calç presenta una major plasticitat facilitant la seva aplicació amb llana en el cas de l'ús en estucats.

6.1.5 Fraguat

L'aigua interlaminar, durant el procés de fraguat, permet la dissolució del CO_2 de l'ambient que incrementa la pressió i dissol la portlandita (Ca(OH)_2), sobresaturant l'aigua i produint que aparegui un nou cristall, la calcita (CaCO_3), essent de nou pedra com anteriorment a la calcinació.

El procés de fabricació de la calç, doncs, es resumeix en la figura següent:

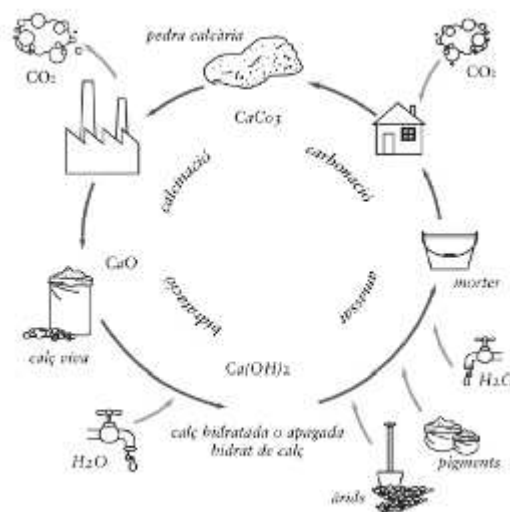


Figura 5: Procés de fabricació de la calç

Una vegada apagada, ha de madurar i per tal de poder ser emprada ha de passar un període mínim de 6 mesos. Quants més anys passi en repòs tindrà millor comportament a posteriori, carbonatant-se de forma òptima en emprar-se en estucs o morters. Evidentment, no totes les canteres de calç ofereixen la mateixa qualitat de producte i quant més percentatge de carbonat disposi la calç, millor qualitat tindrà la calç apagada, sent ideal ja que s'aproxima a la composició del marbre.

Tot i la seva gran utilització en diversos camps d'aplicació, la indústria de la construcció ha reduït el seu ús en benefici a altres materials amb un desenvolupament més ràpid de resistències mecàniques i que permeten major velocitat de construcció com són els ciments i resines, materials apareguts recentment en comparació amb la calç.

Una vegada que la calç és utilitzada, es comença a cristal·litzar i a carbonatar-se, des de la superfície fins a l'interior, conservant un nucli humit, el qual aporta les propietats i l'elasticitat permetent un comportament mecànic més òptim que el ciment Portland. Passats cents d'anys retorna al seu estat original a la cantera, sent roca calcària.

6.2 Tipus de calç

La calç, com a material, es pot presentar de diverses maneres i per tant amb propietats diverses en funció de la proporció d'argila, essent: calç aèria i calç hidràulica, ja sigui natural com artificial.

La majoria dels aglomerants pertanyen als dos grups en major o menor mesura, ja que sempre són necessàries les dues fases per tal de que els aglomerants siguin òptims.



Les calçs aèries han de ser classificades en funció del seu contingut en (CaO + MgO), i les calçs hidràuliques en funció de la seva resistència a compressió.

Aquesta classificació fa referència als requisits mínims de cada tipus. La conformitat amb aquests requisits s'avaluen per mitjà d'un control estadístic de la qualitat tal i com es descriu en els criteris de conformitat de la corresponent norma UNE 459-1:2002, capítol 5.

6.2.1 Calç aèria

S'entén per *calç aèria* aquelles construïdes principalment per òxid o hidròxid de calci que endureixen lentament a l'aire sota l'efecte del diòxid de carboni present a l'aire, perdent d'aquesta manera el 45% del seu pes. Com no posseeixen propietats hidràuliques, no endureixen sota l'aigua.

Hi ha dos tipus de calç aèria, la calç viva i la calç hidratada.

6.2.1.1 Calç viva

La *calç viva (Q)* és una calç aèria constituïda principalment per òxid de calci i de magnesi, produïts per la calcinació de calcària. Les calçs vives tenen una reacció exotèrmica en contacte amb l'aigua. Aquestes es presenten en diferents granulometries que van des de blocs a material finament molt. Aquest tipus de calç inclou: la calç càlcica o grassa i la calç dolomítica o magra.

6.2.1.1.1 Calç càlcica o grassa

La *calç càlcica o grassa (CL)* és la calç constituïda principalment per òxid de calci o hidròxid de calci, sense adició de materials putzolànics o hidràulics. Conté entre 0,1 – 1% d'argila.

6.2.1.1.2 Calç dolomítica o magra

La *calç dolomítica o magra* és calç constituïda principalment per òxid o hidròxid de calç i de magnesi, sense adició de materials putzolànics o hidràulics. Després de la seva cocció a temperatures inferiors a 90º s'obté la calç aèria. Conté entre 2 – 8% d'argilla.

6.2.1.2 Calç hidratada

La *calç hidratada (S)* és calç aèria, càlcica o dolomítica resultant del apagat controlat de les calçs vives. Es produeixen en forma de pols sec, de pasta o de lletada.

Aquest tipus d'aglomerants tenen un problema, que es la seva velocitat de carbonatació en l'interior d'un morter, també les condicions ambientals per a que es doni la carbonatació es un problema.

6.2.2 Calç hidràulica

La *calç hidràulica (HL)* està constituïda per hidròxid de calci, silicats de calci i aluminats de calci produïts per la barreja dels constituents adients. Per altra banda, la *calç hidràulica natural (NHL)* és aquella produïda per la calcinació de les calcàries més o menys argiloses (conté més del 8% d'argila) o silícies amb reducció a pols mitjançant el apagat amb o sense mòlta.

Totes les calçs hidràuliques tenen la propietat d'endurir-se amb l'aigua, tot i que el diòxid de carboni de l'aire també contribueix en el procés de fraguat.

Dins d'aquest grup de calçs es troben les calçs amb adicions de materials, denominades amb la lletra Z, que contenen materials hidràulics o putzolànics adequats fins a un 20% en massa.

Les calçs de hidraulicitat superiors a la de les calçs hidràuliques naturals es denominen "Calçs Hidràuliques Artificials" ja que contenen substàncies afegides abans o després de la cocció, com per exemple:

- Clinker, són silicats i aluminats hidratats, obtinguts per cocció a sobre de la sinterització (1500º).
- Putzolanes d'origen natural (volcànic) o bé artificial (barreja de sílice, alumini i òxid de ferro).
- Cendres volants, que provenen de la combustió de petroli.
- Escòries siderúrgiques.
- Filers calcaris.

Això permet entrar en el món dels ciments "naturals" (ciments cuits sota la sinterització) ja que els seus elements constitutius són pràcticament iguals.

6.3 Requisits principals de la calç per a construcció

Com ja s'ha comentat, la calç es pot presentar de diferents estats i amb propietats diverses. Els diferents tipus de calç per a construcció es nombren a continuació amb la seva corresponent notació abreviada, segons marca la corresponent norma UNE-EN 459-1:2001.



| Designació | Notació |
|-----------------------------|---------|
| Calç càlcica 90 | CL 90 |
| Calç càlcica 80 | CL 80 |
| Calç càlcica 70 | CL 70 |
| Calç dolomítiques 85 | DL 85 |
| Calç dolomítiques 80 | DL 80 |
| Calç hidràulica 2 | HL 2 |
| Calç hidràulica 3,5 | HL 3,5 |
| Calç hidràulica 5 | HL 5 |
| Calç hidràulica natural 2 | NHL 2 |
| Calç hidràulica natural 3,5 | NHL 3,5 |
| Calç hidràulica natural 5 | NHL 5 |

Taula 3: Designació de la calç

A més de caracteritzar la calç segons el seu tipus, les calçs aèries hauran d'identificar-se segons la forma de subministrament, com es mostra en els exemples següents:

- Calç càlcica 90, de manera de calç viva, s'identifica per: *CL 90-Q*
- Calç càlcica 80, de manera de calç hidratada, s'identifica per: *CL 80-S*
- Calç dolomítica 85, de manera de calç semihidratada, s'identifica per: *DL 85-S1*
- Calç hidràulica 5, s'identifica per: *HL 5*
- Calç hidràulica natural 3, 5, amb adicions putzolàniques, s'identifica per: *NHL 3, 5 -Z*

6.3.1 Requisits químics

Per altra banda, la composició de la calç de construcció, determinada segons norma UNE-EN 459-2:2001, ha de seguir els valor següents:

| Tipus de calç | CaO+MgO | MgO | CO ₂ | SO ₃ | Calç lliure |
|---------------|---------|------------------|-----------------|--------------------|-------------|
| CL 90 | ≥ 90 | ≤ 5 ^c | ≤ 4 | ≤ 2 | - |
| CL 80 | ≥ 80 | ≤ 5 ^c | ≤ 7 | ≤ 2 | - |
| CL 70 | ≥ 70 | ≤ 5 | ≤ 12 | ≤ 2 | - |
| DL 85 | ≥ 85 | ≥ 30 | ≤ 7 | ≤ 2 | - |
| DL 80 | ≥ 80 | ≥ 5 | ≤ 7 | ≤ 2 | - |
| HL 2 | - | - | - | ≤ 3 ^b | ≥ 8 |
| HL 3,5 | - | - | - | ≤ 3 ^b | ≥ 6 |
| HL 5 | - | - | - | ≤ 3 ^b | ≥ 3 |
| NHL 2 | - | - | - | ≤ 3 ^b | ≥ 15 |
| NHL 3,5 | - | - | - | ≤ 3 ^{a,b} | ≥ 9 |
| NHL 5 | - | - | - | ≤ 3 ^b | ≥ 3 |

NOTA.- Els valors s'apliquen a tots els tipus de calç. Per la calç viva, aquests valors corresponen al producte acabat, per la

resta de tipus, els valors es refereixen al producte exempt d'aigua lliure i d'aigua combinada.

^a Els valors de la taula s'expressen en percentatges en massa.

^b Un contingut de SO_3 superior al 3% i inferior al 7% és admissible, a condició de que la estabilitat sigui confirmada després de 28 dies de conservació en aigua, segons l'assaig donat a la Norma Europea EN 196-2.

^c Un contingut de MgO fins al 7% és admissible a condició de que l'estabilitat sigui confirmada segons l'assaig donat en l'apartat 5.3 de la Norma Europea EN 459-2:2001

Taula 4: Requisits químics per la calç

Alhora, doncs, la classificació de la calç per a construcció, pel que fa a les seves característiques químiques, es correspon d'una manera més aclaridora en la imatge següent:

| | critèris | denominació | designació actual | designació anterior 1981-1996 |
|-------------------------------|---|--|--|------------------------------------|
| calçs naturals sense additius | Concentració en CaO i MgO | calç càlcica | CL90 90% CaO mín CL80 80% CaO mín CL70 70% CaO mín | calç aèria apagada per construcció |
| | | calç dolomítica | DL85 85% CaO + MgO mín DL80 80% CaO + MgO mín | |
| aglutinants afegits | Resistència mínima a la compressió | calç hidràulica natural | NHL 2 NHL 3.5 NHL 5 | XHN o calç hidràulica natural |
| | | calç hidràulica natural amb afegits de materials hidràulics o puzolànics 20% màx | NHL-Z 2 NHL-Z 3.5 NHL-Z 5 | |
| aglutinants reformulats | | calçs CL i DL barrejades amb materials hidràulics o puzolànics | HL 2 HL 3'5 HL 5 | no designats |

HL: calç hidràulica – NHL: calç hidràulica natural – DL: calç dolomítica – CL: calç càlcica

Figura 6: Classificació de la calç segons les seves característiques químiques

6.3.2 Requisits físics

Segons la Norma Europea EN 459-2:2001, les resistències normalitzades dels tipus de calç hidràulica i de les calçs hidràuliques naturals són les resistències a compressió determinades als 28 dies. Els valors obtinguts han de ésser els següents:



| Tipus de calç de construcció | Resistència a compressió (MPa) | |
|---|--------------------------------|------------------------|
| | 7 dies | 28 dies |
| HL 2 y NHL 2 | - | ≥ 2 a ≤ 7 |
| HL 3,5 y NHL 3,5 | - | $\geq 3,5$ a ≤ 10 |
| HL 5 y NHL 5 | ≥ 2 | ≥ 5 a $\leq 15^a$ |
| ^a Si HL 5 y NHL 5 tenen una densitat aparent inferior a $0,90 \text{ kg/dm}^3$, es permet que la resistència pugui arribar fins a 20 MPa. | | |

Taula 5: Resistència a compressió de les calçs hidràuliques i de les hidràuliques naturals

6.3.2.1 Altres propietats físiques de la calç viva i de la calç hidratada

Quan es determinin les propietats físiques citades en la Taula 5, segons la Norma Europea EN 459-2:2001, aquestes hauran de complir els valors indicats en ella, juntament amb els valors de la Taula 6.

| Tipus de calç de construcció | Estabilitat després del apagat ^a segons l'apartat 5.3.3 de la Norma UNE-EN 459-2:2001 ^b | Rendiment segons l'apartat 5.9 de la Norma UNE-EN 459-2:2001 ^b ($\text{dm}^3/10\text{kg}$) |
|---|---|---|
| CL 90 | Segons assaig | ≥ 26 |
| CL 80 | | |
| CL 70 | | |
| DI 85 | Segons assaig | - |
| DI 80 | Segons assaig | - |
| ^a Apagat segons les instruccions del fabricant de la calç. | | |
| ^b Aquests requeriments s'apliquen a la calç de construcció pels morters de fàbrica i estucats interiors i exteriors. | | |

Taula 6: Requisits físics per la calç viva



| Tipus de calç de construcció | Finor ^f segons Norma Europea EN 459-2:2001 en apartat 5.2 (%) | | Aigua lliure segons Norma Europea EN 459-2:2001 en apartat 5.11 | Estabilitat ^{b d} | | | Assaig per morters ^{e f} | | Temps de enduriment | |
|------------------------------|--|--------|---|---|--|---|---|--|--|--------------------|
| | | | | Per calçs de construcció diferents de la calç de pasta y dolomítiques hidratades ^c | | Cal en pasta i dolomítica hidratada | Penetració segons Norma Europea EN 459-2:2001 apartat 5.5 | Contingut en aire segons Norma Europea EN 459-2:2001 apartat 5.7 | Inicial | Final ^h |
| | | | | Mètode de referència segons Norma Europea EN 459-2:2001 apartat 5.3.2.1 | Mètode alternatiu segons Norma Europea EN 459-2:2001 apartat 5.3.2.2 | Mètode segons Norma Europea EN 459-2:2001 apartat 5.3.3 | | | Segons Norma Europea EN 459-2:2001 apartat 5.4 | |
| | 0,09 mm | 0,2 mm | % | mm | mm | | mm | % | h | |
| CL80 | ≤ 7 | ≤ 2 | ≤ 2 | ≤ 2 | ≤ 20 | Compleix assaig | > 10 i < 50 | ≤ 12 | - | |
| NHL 3,5 NHL 5 | ≤ 15 | ≤ 5 | ≤ 2 | ≤ 2 | ≤ 20 | - | | ≤ 20 | > 1 | ≤ 15 |

^a Per les calç en pasta, el contingut d'aigua lliure és ≤ 70% i ≥ 45%.

^b Mirar Norma Europea EN 459-2:2001 apartat 5.3.

^c Per les calçs hidràuliques i les calçs hidràuliques naturals tenint un contingut en SO₃ > 3% i ≤ 7%, l'estabilitat s'assaja segons Norma Europea EN 459-2:2001 apartat 5.3.2.3.

^d Les calçs càlquies hidratades, les calçs en pasta i les calçs dolomítiques que contenen mida de grans de diàmetre > 0,2 mm, han de ésser estables quan s'assagin segons la Norma Europea EN 459-2:2001 apartat 5.3.4.

^e Utilitzant un morter normalitzat segons apartat 5.5.1 de la Norma Europea EN 459-2:2001.

^f No s'aplica en calçs en pasta.

^g Els requisits sobre la finor i contingut d'aigua lliure a la calç qualsevol sigui l'ús previst. Els requisits d'estabilitat, de penetració, de contingut en aire i de temps de enduriment s'aplica únicament a la calç de construcció per morters de fàbrica i revestiments interiors i exteriors.

^h No s'aplica a HL2 i NHL 2.

Taula 7: Requisits físics per la calç hidràulica i hidràulica natural ^g

6.3.3 Requisits de durabilitat

La durabilitat del morter y altres productes té a veure amb l'elecció de la calç de construcció, particularment en condicions ambientals severes, com pel que fa a resistència a gelades i a substàncies químiques.

La seva elecció s'efectua a partir del tipus i de la classe de resistència segons les diferents aplicacions i classes d'exposició conforme a la Norma Europea 459-2:2001 i/o reglaments apropiats per morters i altres productes per la construcció.

6.3.4 Altres propietats a tenir en compte

6.3.4.1 Propietats tècniques

La calç aporta diverses propietat tècniques interessants per les accions de restauració com la poca retracció en cas d'estar correctament formulada, un bon comportament tèrmic, l'adherència amb aigua, la reacció amb substàncies silícies de baixa estabilitat, és transpirable al vapor d'aigua i per tant s'adapta correctament als canvis higromètrics, no acumula humitat i té un bon comportament davant aquesta, alta durabilitat, resistència al foc, és material neutre ja que no interacciona negativament amb altres materials i té una elevada plasticitat i treballabilitat.

6.3.4.2 Propietats estètiques

Estèticament, la calç, permet avantatges com la gran varietat de textures, un ampli cromatisme, la vibració òptica i profunditat, disposa de reflexió de la llum especular o difusa segons l'acabat i és fàcilment reversible.

6.3.4.3 Propietats ecològiques

Tenint en compte que es tracta d'un material tradicional i que, actualment, es té en compte en gran mesura els factors ecològics, la calç proporciona característiques que produeixen menys emissions de CO₂ durant el procés de fabricació, absorbeix CO₂ durant el fraguat, no desprèn gasos tòxics, es treballa amb aigua i prové de recursos renovables i és ràpidament biodegradable.

6.4 Introducció als morters de calç

6.4.1 Origen i desenvolupament

L'origen dels morters està íntimament lligat al dels aglomerants, que formen part important de la seva composició.

Fa 5000 anys apareix al nord de Xile les primeres obres de pedra unides per un aglomerant hidràulic procedent de la calcinació d'algues, les quals aquestes obres formaven les parets dels habitatges indígenes. També els egipcis empraven morters de guix i de la calç en les seves construccions monumentals. Els constructors grecs i romans van descobrir que concrets materials volcànics (cendres), barrejats amb calcària i arena produïen un morter de gran força, capaç de resistir l'acció de l'aigua, dolça o salada.

Fins al segle XVIII només s'utilitzaven els morters de calç, guix i materials putzolònics. Pel 1750-1800 es va investigar barreges calcinades d'argila i calcària.

Al segle XIX, *Vicat* va realitzar una sèrie d'investigacions que descrivien el comportament hidràulic de les barreges de calcàries i argila, i va proposar al 1818 el sistema de fabricació que es segueix emprant en l'actualitat. *Vicat* va encaminar la fabricació del ciment per mitjà de barreges calcàries i argiles dosificades en les proporcions convenients. Aquest sistema és de via humida i va orientar l'inici de l'actual procés de fabricació.

Al 1824, *James Parker* i *Joseph Aspdin* patenten el ciment Portland, donant aquest nom per motius comercials, en raó al seu color i duresa que recorden a les *pedres de Portland*, matèria que van obtenir de la calcinació a alta temperatura d'una *calcària argilosa*.

Des de final del segle XIX es perfecciona el procés de fabricació que posteriorment va desencadenar la fabricació dels actuals ciments Portland, material íntimament lligat a la producció dels morters d'avui.

La tecnificació del material al segle XX produeix des de les últimes dècades un desplaçament dels morters fets *in situ* a favor dels morters industrials. Finalment, la major exigència i el control en les propietats dels morters, provoca en els últims anys una forta tendència cap al desenvolupament del morter sec.

6.4.2 Característiques generals

Dins de les prestacions que ofereix un morter hem de distingir dues etapes diferenciades pel seu estat físic, que es denominen estat fresc i estat endurit.

L'estat fresc respon a la fase del morter una vegada barrejat i amassat. La seva durada varia depenent del temps d'enduriment requerit per la proporció que integra la barreja, així com per la temperatura, humitat, etc. En aquesta etapa el morter és plàstic i fàcil de treballar, permetent la seva posada en obra. Una vegada superada aquesta fase, el morter endureix fins a consolidar-se.

Les propietats relatives a l'estat fresc es relacionen amb la posada en obra i influiran principalment en el seu rendiment i la qualitat de l'execució, tenint gran influència en les prestacions

finals que aquest morter oferirà. Els requeriments derivats corresponen a les exigències del constructor i operaris.

En canvi, les propietats relatives a l'estat endurit són estipulades per les prescripcions de projecte i pel compliment de la normativa. Aquestes propietats, doncs, corresponen a l'arquitecte o prescriptor.

De qualsevol manera, les característiques del morter, ja sigui fresc o endurit, depenen de la seva aplicació a destí.

Per aquesta raó, es poden anomenar les característiques a tenir en compte del morter fresc i endurit, en les següents:

| Morter fresc | Morter endurit |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> – Consistència. – Temps d'ús – Temps obert – Densitat. Descrit a la pàgina 63 d'aquest document. – Adherència. – Contingut d'ions de clorur – Capacitat de retenció d'aigua | <ul style="list-style-type: none"> – Resistència mecànica. Descrit a la pàgina 71 d'aquest document. – Adherència en estat endurit. Descrit a la pàgina 66 d'aquest document. – Retracció – Absorció d'aigua – Densitat en estat endurit – Permeabilitat al vapor d'aigua – Comportament tèrmic – Comportament davant el foc |

Taula 8: Característiques del morter fresc i endurit

6.4.3 Components: Característiques principals

6.4.3.1 Aglomerants

S'entén com a aglomerant, un material capaç d'unir fragments d'una o varies substàncies i donar cohesió al conjunt per efecte de transformacions químiques en la seva massa, que origina nous compostos.

Els aglomerants emprats en la fabricació de morters són productes artificials de naturalesa orgànica i mineral. S'obtenen a partir de matèries primes naturals i, en el seu cas, de subproductes industrials.

Es distingeixen dos tipus de aglomerants:

- **Calç:** Les calçs emprades en els morters poden ser aèries o hidràuliques. Les seves especificacions es troben a la Norma UNE-EN 459-1.

La calç s'empra, en general, per millorar la plasticitat del morter i aclarir el seu color.

- **Ciments:** Són dels aglomerants hidràulics més emprats en la construcció degut a estar formats, bàsicament, per la barreja de calcàries, argila i guix.

6.4.3.2 Àrids

Els àrids que formen part dels morters són materials granulars inorgànics de mida variable. Es considera un material de naturalesa inert ja que per ells mateixos no han d'actuar químicament davant els components del ciment o davant de components externs (aire, aigua, gel, etc.). Tot i això, si influeixen de manera determinant en les propietats físiques del morter o en la unió al aglomerants.

En general no són acceptables els àrids que contenen sulfats oxidables, silicats inestables o components de ferro igualment inestables.

Segons la procedència i mètode d'obtenció, els àrids es classifiquen en:

| | | |
|--------------------------|---|---|
| Àrids naturals | Són els procedents de jaciments minerals obtinguts només per procediments mecànics. | |
| | Granulars | S'obtenen bàsicament de graveres que exploten dipòsits granulars. Aquests àrids s'utilitzen després d'haver-se rentat i classificat. Tenen forma arrodonida, amb superfícies llises i sense arestes, i es denominen "àrids rodats". Són àrids principalment de naturalesa silícica. |
| | De matxuqueig | Es produeixen en canteres després d'arrancar els materials dels massissos rocosos i sotmetre'ls posteriorment a trituració, molta i classificació. Presenten superfícies rugoses i arestes vives. Són, principalment, àrids de naturalesa calcària, tot i que també poden ser de naturalesa silícica. |
| Àrids artificials | Estan constituïts per subproductes o residus de processos industrials, resultants d'un procés que compren una modificació tèrmica o altres. Són les escòries siderúrgiques, cendres volants de la combustió del carbó, filers, etc. | |
| Àrids reciclats | Resulten del tractament del material inorgànic que s'ha emprat prèviament en la construcció, per exemple, les procedents de l'enderroc d'edificacions, estructures fermes, etc. | |

Taula 9: Tipus d'àrids

6.4.3.3 Additius

Es tracta de substàncies o materials afegits, abans o durant la barreja del morter, en petites quantitats, en relació a la massa del ciment (la seva proporció no supera el 5% en massa del contingut de ciment). La seva funció és aportar a les propietats del morter, tant en estat fresc com endurit, concretes modificacions i amb caràcter permanent.



Els additius aptes per morters han de complir les exigències prescrites a la Norma UNE-EN 934. Els més comuns es classifiquen segons les propietats que confereixen el morter, segons la seva funció principal, com: airejants, plastificants, retardants, hidrofugants, retenidors d'aigua, resines...

6.4.3.4 Addicions

Les addicions són materials inorgànics que finament dividits es poden emprar en la fabricació de morters amb la finalitat de millorar certes propietats o aconseguir propietats especials. Són preferentment materials inorgànics tals com: pigments, filers minerals, putzolanes, cendres volants, escòries de sílice, etc.

7. CARACTERITZACIÓ DEL MORTER DE CALÇ ELABORAT

7.1 Components del morter de calç elaborat

7.1.1 Aglomerant: Calç

Existeixen diferents tipus de calç en l'actualitat, cadascuna amb unes propietats particulars pel que fa a propietats, usos, entre altres. Les estudiades en aquest projecte són: calç Pascual, calç Pachs, calç Saint-Astier i Biocalce.

La calç a assajar ha d'exposar-se a l'aire ambiental el menor temps possible. Per tal de que l'emmagatzematge sigui sempre igual pel que fa a temperatura i humitat, els sacs de la calç que s'assajarà es trobaran dins d'un espai tancat durant tot el procés.

7.1.1.1 Calç Pascual

L'empresa *Cales Pascual* és d'origen valencià i entre totes les tipologies de calç que disposa, per a diferents usos cadascuna d'elles, poden ser nacionals o internacionals segons les característiques. En aquest cas, la calç emprada pels assajos de laboratori ha estat la calç hidràulica de caràcter nacional i d'aspecte marró clar. En la seva composició química es troben percentatges de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO i SO_3 procedents de la matèria prima.

| | |
|----------------------|--|
| Fabricat a | València |
| Producte | Nacional |
| Tipus de calç | Calç hidràulica |
| Ús | Renovació i restauració de construccions antigues i monuments històrics (esglésies, torres, castells...), construïts sovint amb calç hidràuliques naturals. La utilització de la calç hidràulica sobre les maçoneries antigues permet limitar els riscos de fissures i els desordres diversos. |

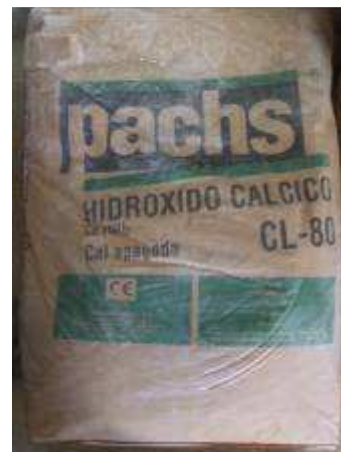


A l'annex 1 s'adjunta la fitxa tècnica del producte fent referència a dades per l'estudi d'aquesta. Algunes de les característiques citades es comprovaran al laboratori per tal de fer els assajos pertinents.

7.1.1.2 Calç Pachs

L'empresa *Calç Pachs* procedeix de Barcelona, concretament de Pacs del Penedès. La tipologia de calç emprada es defineix com hidròxid càlcic CL80, calç apagada, d'aspecte blanquinós. En la seva composició es troba petits percentatges de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO i CO_3Ca procedents de la matèria prima, pedra calcària de caràcter natural. El pes específic és de 2,20 kg/l.

| | |
|----------------------|--|
| Fabricat a | Pacs del Penedès (Barcelona) |
| Producte | Nacional |
| Tipus de calç | Hidròxid càlcic CL80 |
| Ús | En construcció per la fabricació dels morters i per l'estabilització de paviments argilosos. |



A l'annex 2 s'adjunta la fitxa de seguretat del producte, com també la fitxa tècnica del producte. Algunes de les característiques citades es comprovaran al laboratori per tal de fer els assajos pertinents.

7.1.1.3 Calç Saint-Astier

La *Chaux Saint-Astier*, de procedència francesa, disposa de diferents tipus de calç i la emprada en aquest cas ha estat la calç hidràulica pura natural NHL5, d'aspecte menys clara que la calç blanca. En la seva composició química es troben percentatges de SiO_2 , Ca(OH)_2 , CaCO_3 i CaO , aquest darrer destaca en percentatge amb la resta suposant un 57%, essent procedents de la matèria prima. La seva puresa garanteix consistència i resistència que permet ser utilitzada múltiples vegades sense afegir ciment.

| | |
|----------------------|---|
| Fabricat a | Saint-Astier |
| Producte | Internacional |
| Tipus de calç | Calç hidràulica natural pura NHL5 |
| Ús | En construcció per fabricar morters, en consolidacions de treballs de paleta, emblanquinats, enllosats, entre altres. |



La calç Saint-Astier NHL 5 mostra importants punts per la seva aplicació en bioconstrucció degut a que redueix les emissions de CO_2 a l'atmosfera durant l'etapa de producció. Aquest tipus de calç absorbeix la major part del CO_2 durant el procés de curació, a diferència del ciment que no absorbeix CO_2 .

Els productes de Saint-Astier han rebut la "LABEL VERT EXCELL" o la Etiqueta Verda, a França, que garanteix la manca total de contaminants i qualsevol risc de contaminació. El material emprat a la construcció amb NHL pot ser reutilitzat o reciclat.

| | Portland Cement | NHL 2 | NHL 3.5 | NHL 5 |
|---|-----------------|-------------|-------------|--------------------|
| CO ₂ consumit per forn | 381 | 68 | 62 | 75.5 |
| CO ₂ emissió (Descarbonatació del producte) | 250 | 90 | 85 | 99 |
| Emissió Total de CO ₂ | 631 | 158 | 147 | 174.3 |
| Reabsorció CO ₂ | 0 | 74 | 65 | 60.5 |
| Emissió total de CO ₂ (Inclòs el fuel) | 631* | 84 | 81.5 | 114 |
| | Estalvi 0% | Estalvi 87% | Estalvi 87% | Estalvi 82% |

* Font: Portland Cement Association, U.S. Cement Industry Fact Sheet from EBN Volume 2, No.2

Taula 10: Taula de l'estalvi de CO₂ en la utilització de NHL de Saint-Astier

A l'annex 3 s'adjunta la fitxa tècnica i les propietats de la calç hidràulica Saint Astier, com també el marcatge CE. Algunes de les característiques citades es comprovaran al laboratori per tal de fer els assajos pertinents.

7.1.1.4 Calç BioCalce

La calç *Biocalce* emprada és un morter eco-compatible de calç natural pura NHL 3,5 i d'aspecte blanc per usos generals i en exteriors en elements subjectes a requeriments estructurals. Els elements naturals del Biocalce Muro utilitzat són calç natural pura NHL 3,5 certificada, arena sílica entada de cantera fluvial (0,1 – 1 mm), calcàries dolomítiques seleccionades (0 – 2,5 mm) i pols de marbre pur blanc (0 – 0,2 mm). La densitat aparent del pols és de 1,46 kg/dm³.

| | |
|----------------------|---|
| Fabricat a | Sassuolo Mo (Italia) Contacte a Espanya: Castellón de la Plana |
| Producte | Internacional |
| Tipus de calç | Calç natural pura NHL 3,5 |
| Ús | Els morters naturals per construcció i consolidació, enllosats i sanejament, soleres, adhesius... i els morters de rejuntat naturals per la col·locació de pedra natural, ceràmica... S'empra també per restauració i conservació de grans monuments. |



A l'annex 4 s'adjunta la fitxa de propietats de la calç natural pura NHL 3,5 Biocalce. Algunes de les característiques citades es comprovaran al laboratori per tal de fer els assajos pertinents.

7.1.2 Àrid: Arena

En el procés d'assaig dels morters per a rehabilitació s'han emprat les arenes que a continuació es detallen, totes elles amb unes propietats diferents, les quals aportaran característiques diferents als morters. Les arenes estudiades han estat: arena natural silícica de Bellpuig, arena artificial de matxucat de roques calcàries d'Arbeca, arena procedent del Pallars i arena procedent de la Vall d'Aran.

7.1.2.1 Arena natural silícica de Bellpuig



Figura 7: Arena natural silícica de Bellpuig

Les propietats principals de l'arena natural silícica de Bellpuig són les següents:

7.1.2.1.1 Granulometria

La Norma UNE-EN 933-1 i UNE-EN 933-2 descriu el procediment de l'assaig de l'anàlisi granulomètric.

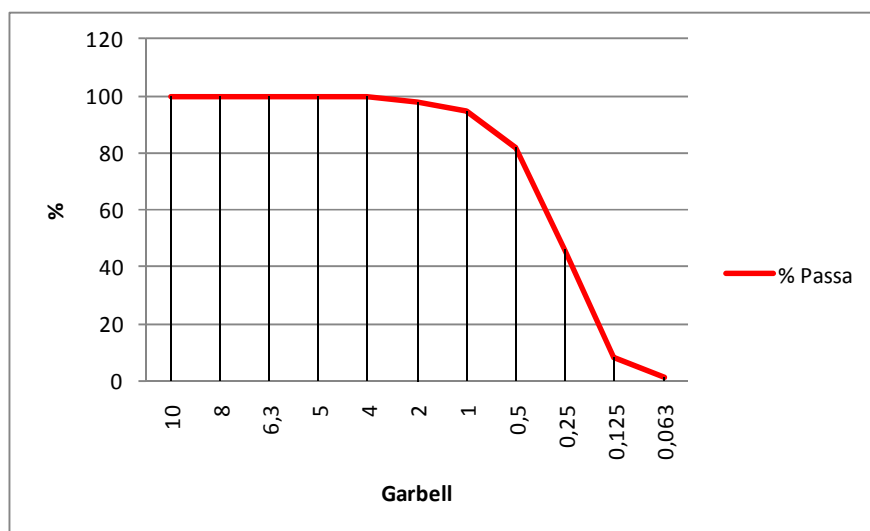


Figura 8: Granulometria arena silícica de Bellpuig

7.1.2.1.2 Equivalent d'arena

L'equivalent d'arena (SE) correspon a 67 segons l'assaig corresponent en la norma UNE-EN 933-8.

7.1.2.1.3 Densitat de partícules

L'assaig de densitat de partícules es troba en la Norma UNE-EN 1097-6. Per aquest tipus d'arena estudiada, els resultats són els següents:

| | |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Densitat aparent | 2,659 mg/m ³ |
| Densitat de partícules post secat | 2,618 mg/m ³ |
| Densitat de partícules SSD | 2,634 mg/m ³ |

Taula 11: Taula densitats de l'arena silícica de Bellpuig

7.1.2.1.4 Absorció d'aigua

L'assaig d'absorció d'aigua es descriu en la Norma UNE-EN 1097-6. En el cas de l'arena silícica de Bellpuig el valor obtingut es correspon en la següent taula:

| | |
|------------------|--------|
| Absorció d'aigua | 0,58 % |
|------------------|--------|

Taula 12: Taula absorció d'aigua de l'arena silícica de Bellpuig

En l'annex 5 es troba la fitxa tècnica detallada de les propietats d'aquest tipus d'arena.

7.1.2.2 Arena artificial de matxucat de roques calcàries d'Arbeca



Figura 9: Arena artificial de matxucat de roques calcàries

Les propietats principals de l'arena artificial de matxucat de roques calcàries d'Arbeca són les següents:

7.1.2.2.1 Granulometria

La Norma UNE-EN 933-1 i UNE-EN 933-2 descriu el procediment de l'assaig de l'anàlisi granulomètric.

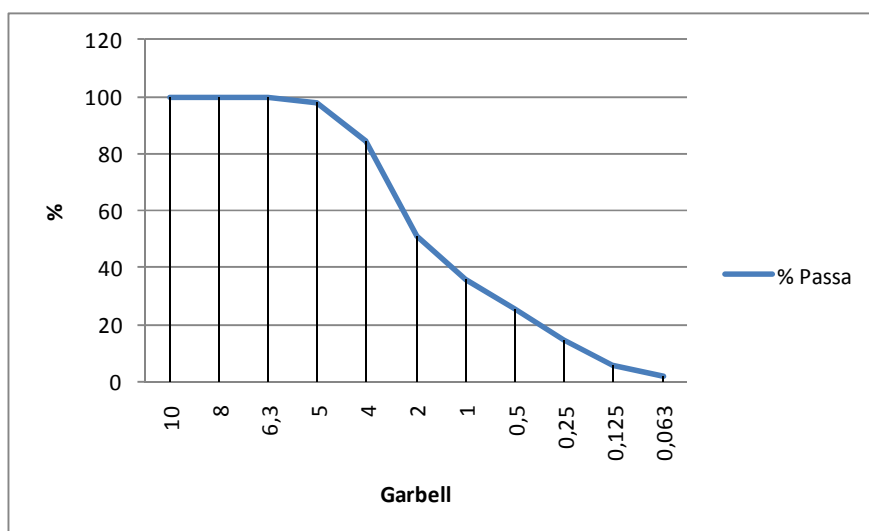


Figura 10: Granulometria arena calcària d'Arbeca

7.1.2.2.2 Equivalent d'arena

L'equivalent d'arena (SE) correspon a 89,1 segons l'assaig descrit en la Norma UNE-EN 933-8.

7.1.2.2.3 Densitat de partícules i absorció d'aigua

L'assaig de densitat de partícules es troba en la Norma UNE-EN 1097-6. Pel tipus d'arena calcària assajada, els resultats són els següents:

| | |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Densitat aparent | 2,630 mg/m ³ |
| Densitat de partícules post secat | 2,560 mg/m ³ |
| Densitat de partícules SSD | 2,590 mg/m ³ |

Taula 13: Taula densitats de l'arena calcària d'Arbeca

7.1.2.2.4 Absorció d'aigua

L'assaig d'absorció d'aigua es descriu en la Norma UNE-EN 1097-6. El valor obtingut en el cas de l'arena calcària és el següent:

| | |
|------------------|--------|
| Absorció d'aigua | 0,91 % |
|------------------|--------|

Taula 14: Taula absorció d'aigua de l'arena calcària d'Arbeca

En l'annex 6 es troba la fitxa tècnica detallada de les propietats d'aquest tipus d'arena.

7.1.2.3 Arena procedent del Pallars



Figura 11: Arena procedent del Pallars

Les propietats principals de l'arena procedent del Pallars són les següents:

7.1.2.3.1 Granulometria

La Norma UNE-EN 933-1 i UNE-EN 933-2 descriu el procediment de l'assaig de l'anàlisi granulomètric.

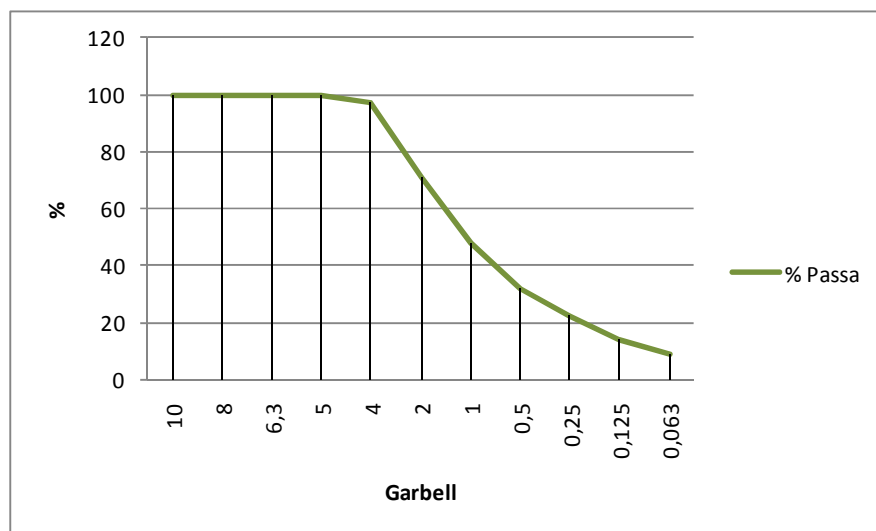


Figura 12: Granulometria arena procedent del Pallars

7.1.2.3.2 Equivalent d'arena

L'equivalent d'arena (SE) correspon a 31 segons l'assaig descrit en la Norma UNE-EN 933-8.

7.1.2.3.3 Densitat de partícules i absorció d'aigua

L'assaig de densitat de partícules es troba en la Norma UNE-EN 1097-6. Pel tipus d'arena assajada procedent del Pallars, els resultats són els següents:

| | |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Densitat aparent | 2,710 mg/m ³ |
| Densitat de partícules post secat | 2,700 mg/m ³ |
| Densitat de partícules SSD | 2,700 mg/m ³ |

Taula 15: Taula densitats de l'arena procedent del Pallars

7.1.2.3.4 Absorció d'aigua

L'assaig d'absorció d'aigua es descriu en la Norma UNE-EN 1097-6. El valor obtingut en el cas de l'arena del Pallars és el següent:

| | |
|------------------|--------|
| Absorció d'aigua | 0,10 % |
|------------------|--------|

Taula 16: Taula absorció d'aigua de l'arena procedent del Pallars

En l'annex 7 es troba la fitxa tècnica detallada de les propietats d'aquest tipus d'arena.

7.1.2.4 Arena procedent de la Vall d'Aran

Figura 13: Arena procedent de la Vall d'Aran

Les propietats principals de l'arena procedent de la Vall d'Aran són les següents:

7.1.2.4.1 Granulometria

La Norma UNE-EN 933-1 i UNE-EN 933-2 descriu el procediment de l'assaig de l'anàlisi granulomètric.

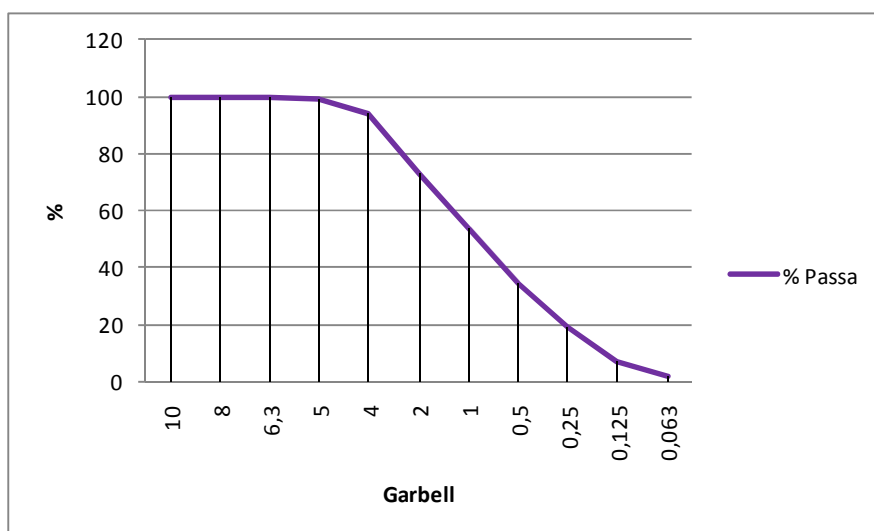


Figura 14: Granulometria arena procedent de la Vall d'Aran

7.1.2.4.2 Equivalent d'arena

L'equivalent d'arena (SE) correspon a 81,6 segons l'assaig descrit en la Norma UNE-EN 933-8.

7.1.2.4.3 Densitat de partícules i absorció d'aigua

L'assaig de densitat de partícules es troba en la Norma UNE-EN 1097-6. Pel tipus d'arena assajada procedent del Pallars, els resultats són els següents:

| | |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Densitat aparent | 2,680 mg/m ³ |
| Densitat de partícules post secat | 2,590 mg/m ³ |
| Densitat de partícules SSD | 2,610 mg/m ³ |

Taula 17: Taula densitats de l'arena procedent de la Vall d'Aran

7.1.2.4.4 Absorció d'aigua

L'assaig d'absorció d'aigua es descriu en la Norma UNE-EN 1097-6. Pel que fa al valor obtingut en el cas de l'arena de la Vall d'Aran és el següent:

| | |
|------------------|--------|
| Absorció d'aigua | 0,96 % |
|------------------|--------|

Taula 18: Taula absorció d'aigua de l'arena procedent de la Vall d'Aran

En l'annex 8 es troba la fitxa tècnica detallada de les propietats d'aquest tipus d'arena.

7.1.3 Aigua

Pels assajos de validació, l'aigua que s'emprarà serà destil·lada o desionitzada. Per la resta d'assajos es pot utilitzar aigua potable.

7.2 Fabricació de les provetes de morter de calç a estudiar

7.2.1 Preparació del morter

En primer terme, cal caracteritzar les dosificacions que s'empren per la realització del morter de calç. Un cop citada aquesta informació es descriurà el procés de la realització del morter amb les proporcions esmentades i emprades.

7.2.1.1 Dosificacions emprades pel morter de calç

La dosificació que s'empren per l'estudi del morter de calç per restauració és de:

| Tipus arena Components del morter | CALÇ PASCUAL | | | |
|---|--------------|----------|-------------|-------------------|
| | Calcària | Silícica | del Pallars | de la Vall d'Aran |
| Calç | 187,5 g | | | |
| Arena | 1500 g | | | |
| Aigua | 250 ml | | | |

Taula 19: Taula dosificació calç Pascual

| Tipus arena Components del morter | CALÇ SAINT-ASTIER | | | |
|---|-------------------|----------|-------------|-------------------|
| | Calcària | Silícica | del Pallars | de la Vall d'Aran |
| Calç | 187,5 g | | | |
| Arena | 1500 g | | | |
| Aigua | 250 ml | | | |

Taula 20: Taula dosificació calç Saint-Astier

| Tipus arena Components del morter | CALÇ PACHS | | | |
|---|------------|----------|-------------|-------------------|
| | Calcària | Silícica | del Pallars | de la Vall d'Aran |
| Calç | 187,5 g | | | |
| Arena | 1500 g | | | |
| Aigua | 250 ml | | | |

Taula 21: Taula dosificació calç Pachs

| CALCE BIOCALCE | |
|---|--|
| Tipus arena Components del morter | Ja conté l'arena en la barreja de calç |
| Calç | 1687,5 g |
| Aigua | 250 ml |

Taula 22: Taula dosificació calç Biocalce

7.2.1.2 Amassat del morter

Es pesa la calç i l'aigua en una balança de precisió $\pm 0,1$ g. Quan l'aigua s'afegeix en volum, aquest ha de preparar-se amb una precisió de ± 1 ml. Es barreja cada lot de morter mecànicament, emprant la amassadora. Els temps de les diferents etapes d'amassat es refereixen als temps de marxa/atur de l'amassadora i han de mantenir-se dins dels ± 2 s.

El procediment de l'amassat ha de ser el següent:

1. S'aboca l'aigua i la calç dins dels recipient, parant compte en evitar tenir pèrdues de cap component.
2. Una vegada ha entrat en contacte l'aigua i la calç, es posa en marxa l'amassadora a velocitat lenta, iniciant els temps d'amassat. Addicionalment es registra el temps, al minut més proper com a "temps zero". Després de 30 segons d'amassat, s'afegeix regularment la sorra durant 30 segons posteriors. Es col·loca l'amassadora a la velocitat ràpida i es continua l'amassat durant 1 minut més.

El temps zero es la referència a partir de la qual es calculen els temps de desemmotllat de les provetes (veure Desemmotllat de les provetes a la pàgina 26 de la Norma) i per la determinació de la resistència (Veure Edat de les provetes pels assajos de resistències mecàniques a la pàgina 26 de la Norma)

3. S'atura l'amassadora durant 90 s. En els primers 30 s, es retira per mitjà d'una espàtula de goma o de plàstic tot el morter de calç adherit a les parets laterals i al fons del recipient i es col·loca en el centre de l'amassadora.
4. Es continua amassant a velocitat ràpida durant 60 s.



Figura 15: Preparació del amassat del morter

7.2.2 Preparació de les provetes d'assaig

7.2.2.1 Mida de les provetes

Les provetes de morter han de ser prismàtiques i de les mides de 40 mm x 40 mm x 160 mm. Aquestes mides venen prescrites a la normativa i s'obtenen dels motlles d'acer específics. Aquestes provetes, a més, no són fixes per tal de poder-les desemmotllar sense provocar cap tipus de fissura o trencament de la mateixa.

7.2.2.2 Emmotllat de les provetes

S'emmotllaran les provetes immediatament després de la preparació de la calç. Amb el motlle i la tolva units, s'introdueix directament del cubell de l'amassadora, en una o varies vegades, amb una cullera adient, la primera de les dues capes (cadascuna aproximadament de 300g) en cada compartiment del motlle.

S'ha d'estendre la capa uniformement, utilitzant una espàtula gran, mantenint-la verticalment i amb els seus eixamplaments en contacte amb el marge superior de la tolva, passant-la per tot el compartiment del motlle, cap endavant i endarrere. Seguidament es compacta la primera capa de calç amb 60 cops amb la compactadora. S'introdueix la segona capa de calç i s'igualar amb l'espàtula petita i es compacta amb 60 cops més.



Figura 16: Procediment d'emmotllat de les provetes prismàtiques

Es retira amb precaució el motlle de la taula i es separa la tolva. Immediatament s'extreu l'excés de calç amb un regle pla mantenint-lo verticalment però inclinat en direcció del moviment amb lents moviments transversals de serra, una vegada en cada direcció. Es repeteix aquest procediment

amb un regle pla mantenint l'angle més agut per allisar la superfície. S'haurà de treure la calç que quedi en el perímetre del motlle com a conseqüència de l'enrassat.

El nombre de passades i l'angle del regle dependrà de la consistència del morter; els morters més rígids requeriran més passades i angles més aguts, es requereix un nombre menor de passades per l'allisat que pel que fa a l'eliminació de l'excés de morter. Cal etiquetar les provetes o marcar els motlles per identificar-les.

7.2.3 Condicionament de les provetes

7.2.3.1 Manipulació i conservació abans de desemmotllar

Es col·loca sobre el motlle una làmina de vidre de aproximadament 210 mm x 185 mm x 6 mm d'espessor i amb els marges arrodonits. Es pot utilitzar una xapa d'acer o d'un altre material impermeable que no reaccioni amb la calç.

Seguidament es col·loca, sobre cada motlle cobert, una superfície horitzontal, en la cambra d'emmagatzematge. Els motlles no s'ha d'apilar un sobre l'altre. Cadascun s'ha de treure de la cambra a l'hora prevista pel desemmotllament.

7.2.3.2 Desemmotllat de les provetes

No s'hauran de fer malbé les provetes a l'hora de desemmotllar. Per tal de desemmotllar es pot emprar martells de plàstic o de goma o bé altres estris especials. Pels assajos a 24h, el desemmotllat es realitzarà com a màxim, 20 minuts abans d'assajar les provetes. Pels assajos superiors a 24h, el desemmotllat es realitzarà entre 20h y 24h després.

Es podrà desemmotllar 24h més tard sempre que la calç no hagi d'adquirir la resistència suficient per ser manipulat sense cap risc de mal. Cal anotar aquest retard del desemmotllat.

Les provetes desemmotllades, elegides per assajar a 24h o a 48h s'han de mantenir cobertes amb un drap humit fins al moment de l'assaig.



Figura 17: Desemmotllat de les provetes prismàtiques

7.2.3.3 Edat de les provetes pels assajos de resistències mecàniques

Es calcula la edat de les provetes des de el "temps zero" (El temps zero és la referència a partir de la qual es calculen els temps de desemmotllat de les provetes i per la determinació de la resistència).

Es realitzaran assajos de resistència a diferents edats dins dels següents límits, segons la norma UNE-EN 196-1:

| |
|----------------|
| 24h ± 15 min |
| 48h ± 30 min |
| 72h ± 45 min |
| 7 dies ± 2h |
| ≥ 28 dies ± 8h |

S'ha estudiat al laboratori el comportament de les provetes a 7 dies, 28 dies i 90 dies tenint en compte aquesta limitació temporal.

7.2.3.4 Ambient del local d'emmagatzematge

Per tal d'un bon emmagatzematge de les provetes, aquestes es troben emmagatzemades en un local tancat i amb un ambient estable pel que fa a humitat i temperatura. Aquestes dades han estat controlades amb un aparell específic, Logger 177-H1 de Testo, durant tot el procés de fabricació de totes les provetes.

Tant la humitat com la temperatura no mostren un grau constant en alguns moments, degut a que s'estava fabricant i/o manipulant els morters de calç, dins el local. Però, tret d'aquests moments, es pot apreciar uniformitat.

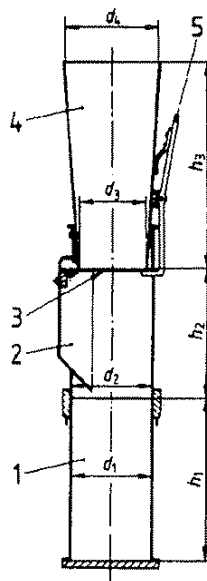
7.3 Assajos

7.3.1 Densitat aparent

La densitat aparent en determinat estat de compactació permet transformar pes a volum i al revés. Relacionat amb la densitat real, permet conèixer el grau de buits que posseeix.

7.3.1.1 Aparells

L'aparell amb el que es determina la densitat aparent ha d'estar construït per un recipient cilíndric amb una capacitat d'un litre (1), per una peça d'entroncament (2) amb una vàlvula de tancament (3) i per un capçal d'omplert (4) amb una palanca per tancar un ressort (5) que acciona la vàlvula de tancament. Accionant la palanca, la vàlvula de tancament s'obre i permet que el material tamissat, contingut en el capçal d'omplert, caigui en el recipient d'un litre.



Llegenda:

- 1 Recipient cilíndric de capacitat 1 litre.
- 2 Peça d'entroncament.
- 3 Vàlvula de tancament.
- 4 Capçal d'omplert.
- 5 Palanca que acciona la vàlvula de tancament.

Figura 18: Aparell per determinar la densitat aparent

Per dimensionar l'aparell amb mides estàndards, es seguiran les determinades a continuació:

| Nº de sèrie | Designació | Dimensions |
|-------------|--|--|
| 1 | Recipient amb una capacitat d'un litre | |
| | Diàmetre interior Alçada interior | $d_1: (87 \pm 1) \text{ mm}$ h_1 : correspon a un contingut (recipient ple) de 1000 cm^3 , marge d'error $\pm 5 \text{ cm}^3$ |
| 2 | Peça d'entroncament | |
| | Diàmetre interior Alçada | $d_2: (87 \pm 1) \text{ mm}$ $h_2: (135 \pm 1) \text{ mm}$ |
| 4 | Capçal d'omplert | |
| | Diàmetre interior, fons | $d_3: (79 \pm 1) \text{ mm}$ |
| | Diàmetre interior, cim Alçada | $d_4: (99 \pm 1) \text{ mm}$ $h_3: (199 \pm 1) \text{ mm}$ |

Taula 23: Dimensions de l'aparell per determinar la densitat aparent

L'assaig que determina la densitat aparent es troba detallat a la Norma UNE-EN 459-2:2001.

7.3.1.2 Procediment de l'assaig

Les calçs per construcció, que no estan seques, es tamissen utilitzant un tamís de tela metàl·lica amb una obertura de malla de 2,0 mm.

Com a pas previ i en la mesura del possible, s'esmicola amb la mà els trossos de calç més gran i s'afegeixen al tamís (material que ha passat pel tamís). Es determina la quantitat de trossos que no s'ha pogut esmicolar amb la mà i es descriu, dins del possible, la seva naturalesa en l'informe d'assaig.

Passos a seguir per duu a terme el procediment:

1. Amb una cullera, s'introdueix en el capçal d'omplert de l'aparell per determinar la densitat aparent, una determinada quantitat de calç en pols (preparada com anteriorment s'ha mencionat), de tal manera que la pols que es troba per sobre del marge adquireixi un angle natural de repòs.
2. S'obre, en aquest moment, la vàlvula de tancament accionant la palanca situada en el capçal d'omplert.
3. Passats 2 minuts, es retira el capçal d'omplert buit, s'enrasa amb un regle la quantitat de calç en pols que s'ha introduït en el recipient i es rebassa el marge.
4. Per últim, es determina la massa del contingut en el recipient.

7.3.1.3 Resultats

L'assaig s'efectua tres vegades, utilitzant cada vegada un nou volum de calç en pols, i si els valors obtinguts varien en més de 10 g un en relació a l'altre, es repeteix l'assaig dues vegades. La densitat aparent de la calç en pols correspon a la mitja dels tres valors que menys s'han desviat, entre ells. La densitat aparent s'expressa en kilograms per decímetre cúbic (kg/dm^3).

A continuació es mostren els resultats obtinguts en l'assaig de densitat aparent de les calçs estudiades, tret de la Biocalce.

| | |
|--------------------------|-------------------------------|
| Calç Pascual | 0,759 kg/dm^3 |
| Calç Pachs | 0,575 kg/dm^3 |
| Calç Saint-Astier | 0,665 kg/dm^3 |

Taula 24: Resultats de l'assaig de densitat aparent

7.3.2 Assajos físics. Resistència mecànica. Flexió i compressió

Les resistències mecàniques dels morters destinats a revestiment han d'atendre fonamentalment en la seva resposta a les tensions provocades per petits moviments diferencials del suport, tensions generades per canvis ambientals i impactes o agressions externes.

La resistència a compressió proporciona una idea de cohesió interna del morter. Indica la seva capacitat de suportar pressions sense disgregar-se. La cohesió també es relaciona amb el grau d'estanquitat que serà capaç d'assolir una vegada disposat.

La resistència a flexió proporciona informació sobre la dificultat que oposen les partícules a separar-se. Per tant, el morter ha de ser suficientment flexible per acompanyar lleus moviments del

suport per causes tèrmiques o estructurals. Una excessiva rigidesa provocaria l'aparició de fissures o esquerdaments.

7.3.2.1 Aparells

7.3.2.1.1 Laboratori

El laboratori on s'efectuï la preparació de les provetes ha de mantenir-se a una temperatura de $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$, i amb una humitat relativa no menor del 50%.

La temperatura i la humitat relativa de l'aire en el laboratori i la temperatura de l'aigua en els recipients de conservació s'han d'anotar almenys una vegada al dia durant les hores de treball.

La calç, la arena normalitzada o qualsevol tipus emprat en els assajos, l'aigua i els aparells emprats en la fabricació de les provetes han d'estar a la temperatura de $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

7.3.2.1.2 Tamisos d'assaig

Les malles dels tamisos han de complir les prescripcions de la Norma ISO 3310-1 i han de ser de les mesures que figuren en la següent segons la Norma ISO 565 (Sèrie R20).

| Mides de malla quadrada (mm) | | | | | |
|------------------------------|------|------|------|------|------|
| 2,00 | 1,60 | 1,00 | 0,50 | 0,16 | 0,08 |

Taula 25: Llum dels tamisos d'assaig

7.3.2.1.3 Amassadora

La amassadora ha de constar de:

- Un recipient d'acer inoxidable d'una capacitat aproximada de 5 litres, amb la forma típica i dimensions de la figura 17 i equipat de manera que pugui ser fixat fermament al bastidor de la amassadora durant el amassat i que l'alçada del recipient amb relació a la pala i, per tant, la separació entre la pala i el recipient, pugui ajustar-se i mantenir-se amb precisió.
- Una pala d'acer inoxidable, de forma típica, mides i toleràncies amb les indicades en la figura 17, accionada per un motor elèctric de velocitats controlades, amb moviments de rotació sobre el seu propi eix, i amb un moviment planetari al voltant de l'eix del recipient. Els dos sentits de rotació han de ser oposats, i la relació entre les dues velocitats no ha de ser un nombre sencer.

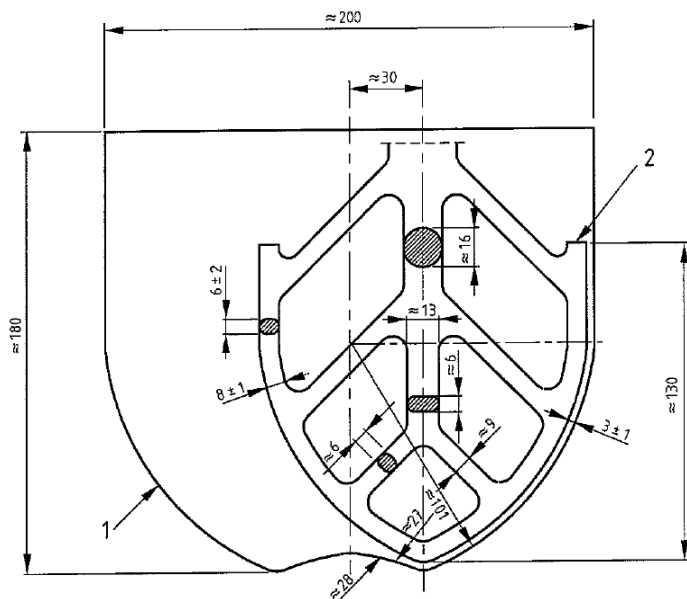


Figura 19: Recipient i pala tipus



Figura 20: Recipient i pala emprada

Les pales i recipients han de formar un conjunt que sempre ha d'emprar-se conjuntament.

L'amassadora ha de treballar a les velocitat donades en la taula següent en el moment de
amassada del morter de calç.

| | Rotació (min ⁻¹) | Moviment planetari (min ⁻¹) |
|------------------|------------------------------|---|
| Velocitat lenta | 140 ± 5 | 62 ± 5 |
| Velocitat ràpida | 285 ± 10 | 125 ± 10 |

Taula 26: Velocitats de la pala mescladora

7.3.2.1.4 Motlles prismàtics

El motlle ha de disposar de tres compartiments horitzontals, de manera que es puguin preparar simultàniament tres provetes prismàtiques de 44 mm x 40 mm de secció transversal i 160 mm de longitud.

El motlle ha de ser d'acer, amb un espessor de paret aproximat de 10 mm. La duresa superficial Vickers de totes les cares interiors ha de ser, almenys, HV 200.

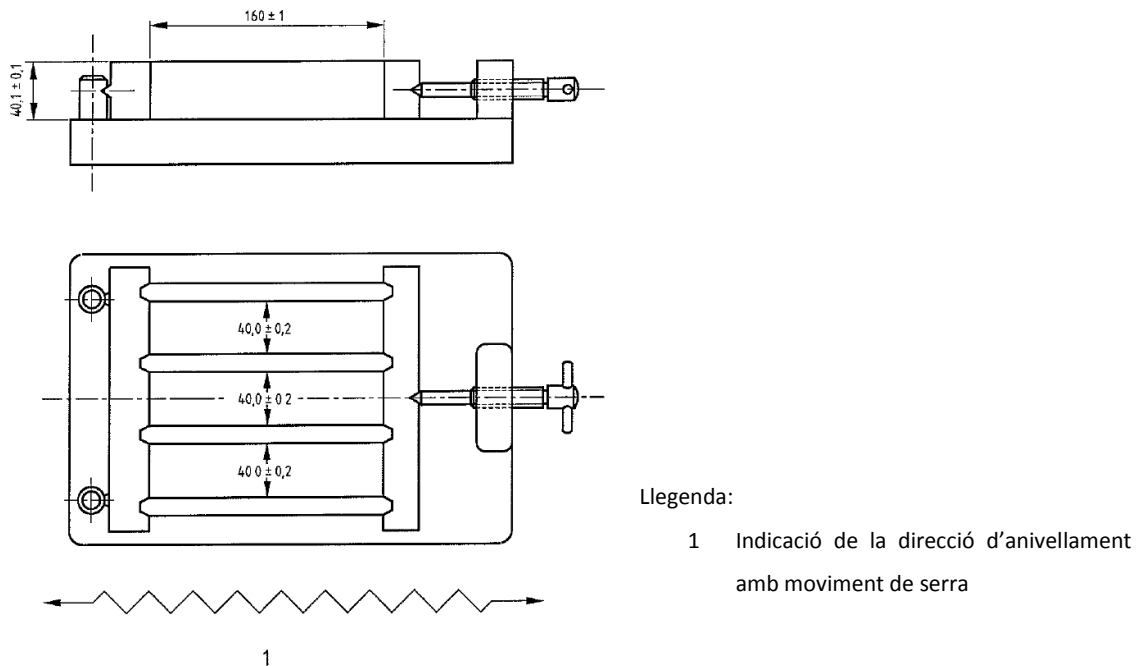


Figura 21: Exemple de motlle típic



Figura 22: Motlle emprat

El motlle ha d'estar construït de manera que es faciliti el desemmotllat de les provetes sense fer-les malbé. Cada motlle ha d'anar proveït de la seva corresponent placa base, d'acer o ferro fos. El conjunt del motlle, encadellat, ha de mantenir-se rígidament unit i fixat a la base. L'encadellat ha de ser tal que no permeti que es produeixin distorsions o falta d'estanquitat. La placa base ha d'assegurar un contacte adequat amb la taula de la compactadora i ser suficientment rígida per evitar vibracions secundàries.

Les peces del motlle han de tenir marques d'identificació per facilitar el seu muntatge i assegurar el compliment de les toleràncies especificades. No han d'intercanviar-se peces similars de diferents motlles.

El motlle muntat ha de complir amb les següents especificacions:

- a) Les dimensions internes i les toleràncies de cada compartiment del motlle han de ser els següents:

| | |
|--------------|---------------------|
| Longitud: | (160 ± 1) mm |
| Amplada: | $(40,0 \pm 0,2)$ mm |
| Profunditat: | $(40,1 \pm 0,1)$ mm |

- b) La tolerància de planor sobre la totalitat de cada cara interna no ha de ser superior a 0,03 mm.
 c) La tolerància de perpendicularitat de cada cara interna amb relació a la superfície del fons del motlle i a la cara interna adjacent, com plans de referència, no ha de ser major que 0,2 mm.
 d) La textura superficial de cada una de les cares internes no ha de tenir una rugositat major que N8.

Els motlles s'han de substituir en el moment que excedeixi qualsevol de les toleràncies especificades.

Al muntar un motlle net, preparat per l'ús, s'ha d'emprar un producte de segellat adequat per impregnar les juntes exteriors i s'ha d'aplicar una capa fina d'oli de desemmotllat a les cares internes del motlle.

Per facilitar l'ompliment del motlle, s'ha d'emprar una tolva metàl·lica, ben ajustada, de parets verticals de 20 mm a 40 mm d'alçada. Mitjançant la vista en planta, les parets de la tolva no han de sobrepassar les interiors del motlle en més de 1 mm. Les parets exteriors de la tolva han d'estar proveïdes de mitjans de fixació per assegurar una posició correcta sobre el motlle.

Per estendre i enrasar el morter de calç, s'han de facilitar dues espàtules i un regle metàl·lic del tipus de la figura següent.

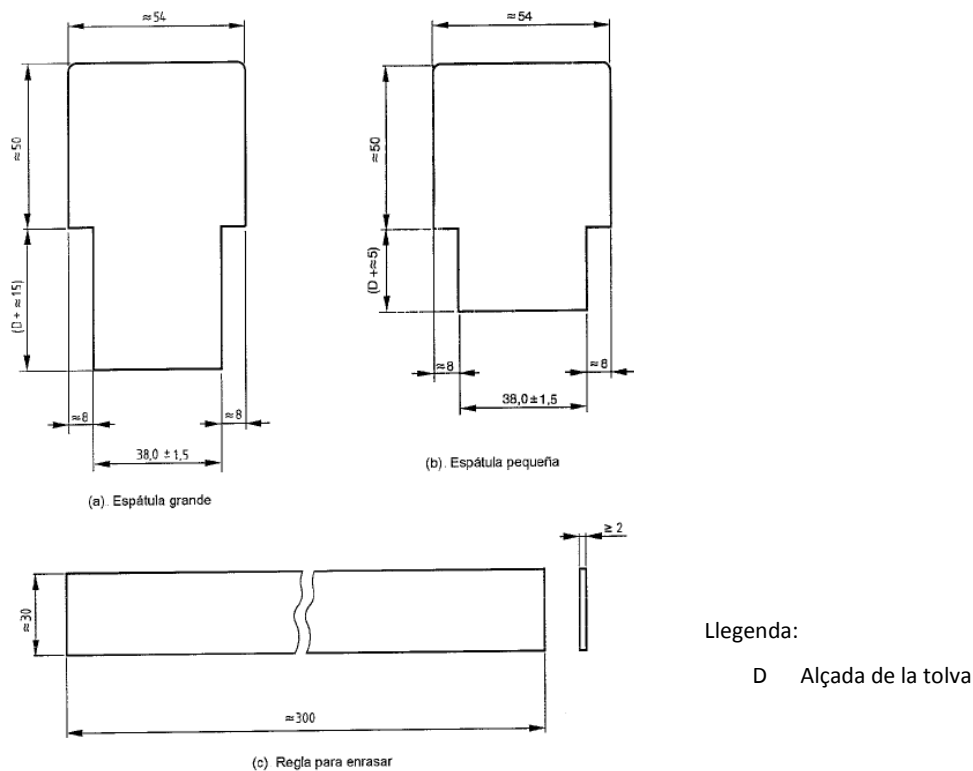


Figura 23: Exemple d'espátula i de regla metàl·lic plà típic

7.3.2.1.5 Compactadora

Compactació manual: Aquesta és la compactació emprada en les provetes de morter de calç. La compactació és realitzada amb la barra o maça de compactar durant l'emmotllament d'aquestes. Es distribueixen els cops de la barra de compactar o maça, d'una manera uniforme sobre la secció transversal del motlle. Es parerà compte que la barra de compactar o maça, no copegi fortament la part inferior del motlle, al compactar-se la primera capa, ni penetri significativament a la capa inferior. Es sotmet el formigó al menys a 25 cops per capa. Amb objecte d'eliminar les bombolles d'aire atrapat, però no de l'aire oclús, després de compactar cada capa, es colpejarà lateralment el recipient, amb cura, amb el maç fins que les bombolles d'aire majors cessin d'aparèixer a la superfície i que s'hagin eliminat les depressions deixades per la barra de compactar o maça. A més, aquest procés també serveix com a unió entre capes de la mateixa proveta.

7.3.2.1.6 Màquina d'assaig per resistència a flexió

La resistència a flexió pot mesurar-se amb una màquina d'assaig per resistència a flexió o mitjançant un dispositiu adequat en la màquina d'assaig a compressió. En qualsevol cas, els equips han de complir els següents requeriments:

- La màquina d'assaig per la determinació de la resistència a flexió ha de poder aplicar càrregues de fins a 10 kN, amb una precisió de $\pm 1,0\%$ de la càrrega registrada en les 4/5 parts superiors del rang emprat, i amb una velocitat de càrrega de (50 ± 10) N/s.
- La màquina ha d'estar proveïda d'un dispositiu de flexió que incorpori dos rodets de recolzament d'acer de $(10,0 \pm 0,5)$ mm, i un tercer rodet de càrrega d'acer del mateix diàmetre que els anteriors i equidistant als altres dos. La longitud d'aquests ha d'estar entre 45 mm i 50 mm.
- Els tres plans verticals que passen pels eixos dels tres rodets, han de ser paral·lels i mantenir-se paral·lels durant l'assaig, equidistant i perpendiculars a la direcció de la proveta. Un dels rodets de recolzament i el de càrrega, han de poder oscil·lar lleugerament per permetre una distribució uniforme de la càrrega sobre l'ample de la proveta, sense aplicar-li a esforços de torsió.

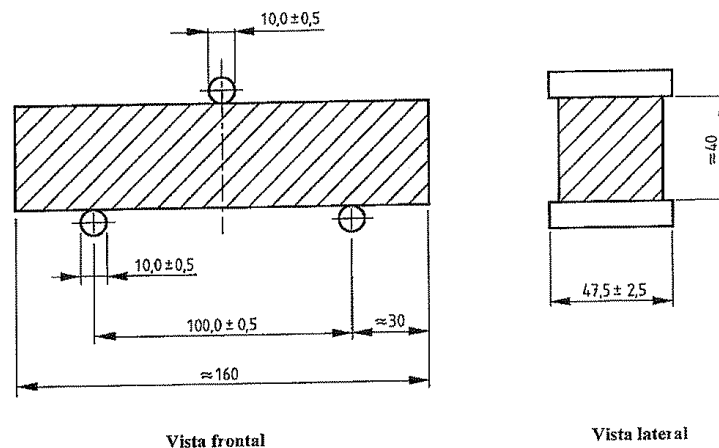


Figura 24: Dispositiu de càrrega per la determinació de la resistència a flexió



Figura 25: Màquina d'assaig emprada per l'assaig de resistència a flexió

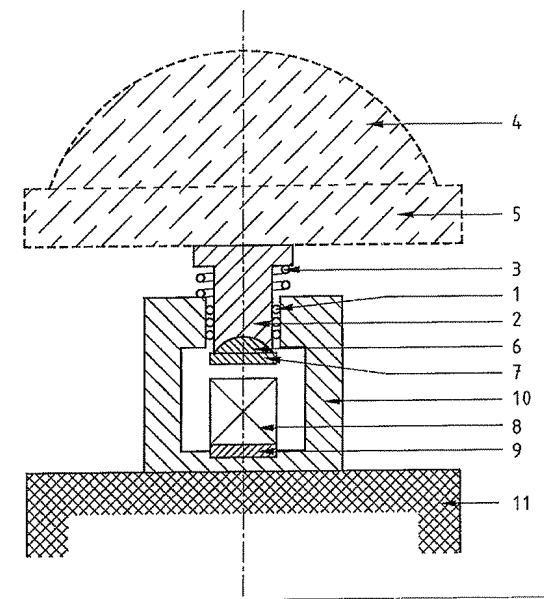
7.3.2.1.7 Màquina d'assaig per resistència a compressió

La màquina d'assaig per la determinació de la resistència a compressió ha de tenir la capacitat adequada a l'assaig:

- Precisió de $\pm 1,0\%$ de la càrrega registrada en les 4/5 parts superiors del rang emprat, verificat d'acord amb la Norma ISO 7500-1.
- Ha de proporcionar una velocitat d'augment de càrrega de (2400 ± 200) N/s.
- Ha d'estar proveïda d'un dispositiu indicador, construït de forma que el valor indicat en el moment de la ruptura de la proveta segueixi indicat després que la màquina es descarregui. Això s'aconsegueix mitjançant un indicador màxim en el manòmetre o amb una memòria en un dispositiu digital.
- L'eix vertical del pistó ha de coincidir amb l'eix vertical de la màquina i, durant la posada en càrrega, la direcció del moviment del pistó ha de ser paral·lela a l'eix vertical de la màquina. A més, la resultant de les forces ha de passar pel centre de la proveta. La superfície del plat inferior de la màquina ha de ser perpendicular a l'eix de la màquina i seguir perpendicular durant la posada en càrrega.
- El centre de la ròtula esfèrica del pla superior ha d'estar en el punt d'intersecció de l'eix vertical de la màquina amb el pla de la superfície inferior del plat superior, amb una tolerància de ± 1 mm. El plat superior ha d'estar lliure per alinear-se en el moment del contacte amb la proveta, però durant la posada en càrrega, la posició relativa dels plats superior i inferior ha de mantenir-se inalterable.
- Els plats de la màquina d'assaig han de ser de carbur tungsten, o d'acer temperat d'una duresa Vickers de com a mínim HV 600. Aquests plats ha de ser com a mínim de 10 mm de gruix, de $(40,0 \pm 0,1)$ mm d'amplada i $(40,0 \pm 0,1)$ mm de longitud. La tolerància de planeïtat de la totalitat de la superfície de contacte dels plats amb la proveta, no ha de ser major que 0,001 mm segons la Norma ISO 1101. la textura superficial, segons la Norma ISO 1302, no ha de ser inferior a N3 ni major de N6 en el moment del subministrament.
- Alternativament, poden utilitzar-se dues plaques auxiliars de carbur de tungsten, o d'acer endurit amb una duresa Vickers de com a mínim HV 600 i de 10 mm d'espessor com a mínim, i que compleixin els requeriments exigits als plats. S'hauran de prendre precaucions per centrar les plaques auxiliars amb relació a l'eix del sistema de càrrega amb una precisió de $\pm 0,5$ mm, i també per alinear les plaques auxiliars amb una tolerància no major de $\pm 0,5$ mm del centre d'una a l'altra.

Quant la màquina de compressió no disposi de ròtula esfèrica, o quan aquesta estigui bloquejada, o quan el diàmetre de la ròtula sigui major que 120 mm, s'ha d'utilitzar un dispositiu. Quan aquest dispositiu sigui necessari, s'ha de col·locar entre els plats de la màquina de forma que transmeti la càrrega de la màquina a les superfícies de compressió de la proveta.

En aquest dispositiu s'ha d'emprar una placa inferior, que pot ser incorporada al plat inferior de la màquina. El plat superior rep la càrrega del plat superior de la màquina per mitjà d'una ròtula esfèrica. Aquesta ròtula forma part d'un conjunt que ha de poder lliscar verticalment sense fregament apreciable en el dispositiu que guia el seu moviment. El dispositiu a compressió s'ha de mantenir completament net i la ròtula esfèrica ha de tenir llibertat de moviment de tal forma que el plat s'adapti inicialment per si mateix a la forma de la proveta, i posteriorment es mantingui fix durant l'assaig. Totes les prescripcions establertes anteriorment s'apliquen de la mateixa forma quan s'utilitza un dispositiu de compressió.



Llegenda:

- 1 Rodament de boles
- 2 Conjunt lliscant
- 3 Moll de recuperació
- 4 Ròtula esfèrica de la màquina
- 5 Plat superior de la màquina
- 6 Ròtula esfèrica del dispositiu
- 7 Plat superior del dispositiu
- 8 Proveta
- 9 Plat inferior del dispositiu
- 10 Dispositiu
- 11 Plat inferior de la màquina

Figura 26: Exemple de dispositiu típic per assajos de resistència a compressió



Figura 27: Màquina d'assaig emprada per l'assaig de resistència a compressió

7.3.2.2 Procediment de l'assaig

7.3.2.2.1 Resistència a flexió

S'empra el mètode de càrrega dels tres punts amb l'equip corresponent. Es col·loca el prisma en la màquina d'assaig, amb una cara lateral sobre els rodets de suport i amb el seu eix longitudinal normal als suports. S'aplica la càrrega verticalment mitjançant rodets de càrrega sobre la cara lateral oposada del prisma i s'incrementa uniformement, a una velocitat de (50 ± 10) N/s fins a trencar.

Es mantenen les meitats del prisma cobertes amb un drap humit fins l'assaig a compressió.

7.3.2.2.2 Resistència a compressió

S'assagen els semiprismes obtinguts de l'assaig de resistència a flexió. Cada semiprisma s'assaja carregant les seves cares laterals amb l'equip adequat.

Cada semiprisma es centra lateralment en relació amb els plats de la màquina $\pm 0,5$ mm, i longitudinalment de forma que la base del prisma no sobresurti dels plats o plaques auxiliars més de 10 mm.

S'augmenta la càrrega uniformement a una velocitat de (2400 ± 200) N/s durant tot el temps d'aplicació de la càrrega fins la ruptura.

7.3.2.3 Resultats

Els resultats obtinguts per la màquina d'assaig es mostren en la pantalla de l'ordinador per tal de visualitzar les dades i el gràfic corresponent a l'assaig.

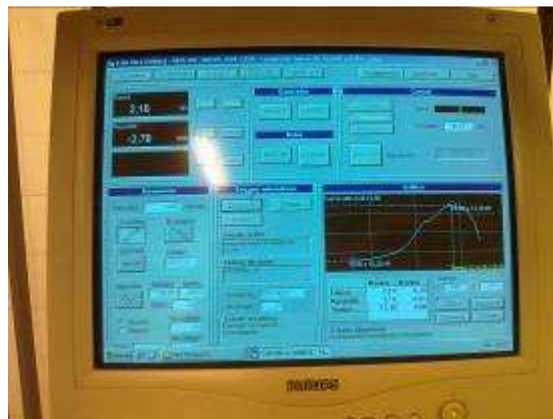


Figura 28: Pantalla d'ordinador amb els resultats obtinguts en un assaig



7.3.2.3.1 Resistència a flexió

La resistència a flexió, R_f , en MPa, es calcula mitjançant la fórmula següent:

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b^3}$$

Llegenda:

- R_f Resistència a flexió (en MPa)
- b Costat de la secció quadrada del prisma en la ruptura (en mm)
- F_f Càrrega aplicada en la meitat del prisma en la ruptura (en N)
- l Distància entre suports (en mm)

Es calcula el resultat de l'assaig de resistència a flexió com la mitja aritmètica dels tres resultats individuals obtinguts de les tres provetes del mateix motlle assajades. Aquests resultats s'expressaran, cadascun d'ells, arrodonits al 0,1 MPa més proper i obtinguts de la determinació realitzada sobre el conjunt de les tres provetes.

7.3.2.3.2 Resistència a compressió

La resistència a compressió, R_c , en MPa, es calcula mitjançant la fórmula següent:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Llegenda:

- R_c Resistència a compressió (en MPa)
- F_c Càrrega màxima de ruptura (en N)
- 1600 = 40 mm · 40 mm, és la superfície dels plans o plaques auxiliars (en mm²)

Es calcula el resultat de l'assaig de resistència a compressió com la mitja aritmètica dels sis resultats individuals obtinguts de les tres provetes del mateix motlle assajades. Aquests resultats s'expressaran, cadascun d'ells, arrodonits al 0,1 MPa més proper i obtinguts de la determinació realitzada sobre el conjunt de les tres provetes.

Si un dels resultats de les sis determinació varia en més de ±10% respecte a la mitja, s'haurà de descartar aquest resultat i es calcularà la mitja aritmètica dels cinc resultats restants. Si un d'aquests resultats dels cinc restants varia més de ±10% respecte a la seva mitjana, es descartarà la totalitat dels resultats i es repetirà la determinació.

8. CARACTERITZACIÓ DEL FORMIGÓ DE CALÇ ELABORAT

La normativa UNE-EN 12390:2001 detalla els assajos pertinents al formigó endurit, en aquest cas pel que fa a les provetes cúbiques amb calç com aglomerant.

Tot el relacionat amb la forma, dimensions i toleràncies de les provetes de formigó cúbiques o cilíndriques i els motlles requerits per fabricar-les, es troba en la norma, UNE-EN 12390-1.

8.1 Components del formigó de calç elaborat

8.1.1 Aglomerant: Calç

En aquest cas, la calç a analitzar amb les provetes de formigó ha estat la calç Pascual, la calç Saint-Astier i la calç Pachs, ja que no són mescles prefabricades com seria el cas de la calç Biocalce.

8.1.1.1 Cal Pascual

La calç Pascual, d'origen valencià, emprada per la fabricació de les provetes de formigó de calç ha estat la calç hidràulica de caràcter nacional i d'aspecte marró clar. En la seva composició química es troben percentatges de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO i SO_3 procedents de la matèria prima.

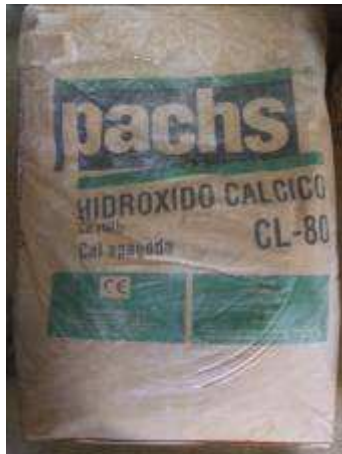


| | |
|----------------------|--|
| Fabricat a | València |
| Producte | Nacional |
| Tipus de calç | Calç hidràulica |
| Ús | Renovació i restauració de construccions antigues i monuments històrics (esglésies, torres, castells...), construïts sovint amb calç hidràuliques naturals. La utilització de la calç hidràulica sobre les maçoneries antigues permet limitar els riscos de fissures i els desordres diversos. |

A l'annex 1 s'adjunta la fitxa tècnica del producte fent referència a dades per l'estudi d'aquesta. Algunes de les característiques citades es comprovaran al laboratori per tal de fer els assajos pertinents.

8.1.1.2 Calç Pachs

La tipologia de calç Pachs emprada ha estat l'hidròxid càlcic CL80, calç apagada, d'aspecte blanquinós i amb origen a Pacs del Penedès. En la seva composició es troba petits percentatges de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO i CO_3Ca procedents de la matèria prima, pedra calcària de caràcter natural. El pes específic és de 2,20 kg/l.



| | |
|----------------------|--|
| Fabricat a | Pacs del Penedès (Barcelona) |
| Producte | Nacional |
| Tipus de calç | Hidròxid càlcic CL80 |
| Ús | En construcció per la fabricació dels morters i per l'estabilització de paviments argilosos. |

A l'annex 2 s'adjunta la fitxa de seguretat del producte, com també la fitxa tècnica del producte. Algunes de les característiques citades es comprovaran al laboratori per tal de fer els assajos pertinents.

8.1.1.3 Chaux Saint-Astier

La chaux francesa Saint-Astier emprada per les provetes de formigó de calç ha la hidràulica pura natural NHL5, d'aspecte menys clara que la calç blanca. La seva composició química la formen percentatges de SiO_2 , Ca(OH)_2 , CaCO_3 i CaO , aquest darrer destaca en percentatge amb la resta suposant un 57%, essent procedents de la matèria prima. La seva puresa garanteix consistència i resistència que permet ser utilitzada múltiples vegades sense afegir ciment.



| | |
|----------------------|---|
| Fabricat a | Saint-Astier |
| Producte | Internacional |
| Tipus de calç | Calç hidràulica natural pura NHL5 |
| Ús | En construcció per fabricar morters, en consolidacions de treballs de paleta, emblanquinats, enllosats, entre altres. |

La chaux Saint-Astier NHL 5 mostra importants punts per la seva aplicació en bioconstrucció degut a que redueix les emissions de CO_2 a l'atmosfera durant l'etapa de producció. Aquest tipus de calç absorbeix la major part del CO_2 durant el procés de curació, a diferència del ciment que no absorbeix CO_2 .

Els productes de Saint-Astier han rebut la “LABEL VERT EXCELL” o la Etiqueta Verda a França que garanteix la manca total de contaminants i qualsevol risc de contaminació. El material emprat a la construcció amb NHL pot ser reutilitzat o reciclat.

| | Portland Cement | NHL 2 | NHL 3.5 | NHL 5 |
|--|--------------------|-------------------|---------------------|----------------------------------|
| CO₂ consumit per forn | 381 | 68 | 62 | 75.5 |
| CO₂ emissió (Descarbonatació del producte) | 250 | 90 | 85 | 99 |
| Emissió Total de CO₂ | 631 | 158 | 147 | 174.3 |
| Reabsorció CO₂ | 0 | 74 | 65 | 60.5 |
| Emissió total de CO₂ (Inclòs el fuel) | 631* Estalvi 0% | 84 Estalvi 87% | 81.5 Estalvi 87% | 114 Estalvi 82% |

* Font: Portland Cement Association, U.S. Cement Industry Fact Sheet from EBN Volume 2, No.2

Taula 27: Taula de l'estalvi de CO₂ en la utilització de NHL de Saint-Astier

A l'annex 3 s'adjunta la fitxa tècnica i les propietats de la calç hidràulica Saint Astier, com també el marcatge CE. Algunes de les característiques citades es comprovaran al laboratori per tal de fer els assajos pertinents.

8.1.2 Àrids: Grava i Terra

8.1.2.1 Grava

La grava emprada per aquest tipus de provetes ha estat l'àrid emprat en qualsevol tipus de formigó amb ciment, es a dir, un tot-u normalitzat d'àrid rodut i net. El tot-u comprat permetria saber la reacció del formigó de calç amb un formigó de ciment ja que es volia fabricar amb unes condicions semblants i de la manera en que es fabrica a obra, per tal de saber si aquest tipus de procés de fabricació era possible i compatible amb els nous materials degut a que són materials amb condicions i característiques diferents.

No es pretenia realitzar unes provetes de formigó de calç tipus, més aviat, unes provetes fabricades a obra i amb les condicions que es poden trobar allà mateix, i poder comprovar, per aquesta metodologia, quina era la dosificació més adient en cada tipus de calç estudiada.

8.1.2.2 Terra

La terra utilitzada era una barreja de terra i àrids de granulometria diversa per tal de poder completar el gradient granulomètric, mes o menys, constant. Aquesta barreja emprada es una que es trobava en la zona, degut a les obres que s'estaven realitzant en el Parc Científic i Tecnològic de Gardeny.

A l'igual que amb la grava, les provetes amb terra fabricades pretenien mostrar resultats comparatius per així obtenir una barreja que, comparada amb la grava, mostrés canvis a causa dels fins de la seva granulometria.

8.1.3 Aigua

Pels assajos de fabricació de totes les provetes de formigó s'utilitza aigua potable proporcionada pel medi que es troba en el lloc on es realitzen, en aquest cas, per mitjà d'una aixeta connectada a l'abastiment d'aigua.

8.2 Fabricació de les provetes de formigó de calç a estudiar

8.2.1 Preparació del formigó

Inicialment, cal caracteritzar les dosificacions que s'empren per la realització del formigó de calç. Seguidament, es descriurà el procés de fabricació del formigó amb les proporcions esmentades i emprades.

8.2.1.1 Dosificacions emprades pel formigó de calç

La dosificació que s'empra per l'estudi del formigó de calç es divideix en dos grups, un emprant grava i un altre emprant arena, però en qualsevol cas, amb dosificacions diverses però iguals en tots dos casos, per saber l'òptima per cada tipus de calç emprada. Aquestes dosificacions es realitzen en volum, essent, 5%, 10% i 15% del total.

| CALÇ PASCUAL | | | |
|--------------|------|-----|-------|
| % | 5% | 10% | 15% |
| Calç | 1,5l | 3l | 6,75l |
| Grava | 30l | 30l | 45l |

| CALÇ PASCUAL | | | |
|--------------|------|-----|------|
| % | 5% | 10% | 15% |
| Calç | 1,5l | 3l | 4,5l |
| Terra | 30l | | |

Taula 28: Taula dosificació formigó calç Pascual

| CALÇ PACHS | | | |
|------------|-------|------|-------|
| % | 5% | 10% | 15% |
| Calç | 2,25l | 4,5l | 6,75l |
| Grava | 45l | | |

| CALÇ PACHS | | | |
|------------|------|-----|------|
| % | 5% | 10% | 15% |
| Calç | 1,5l | 3l | 4,5l |
| Terra | 30l | | |

Taula 29: Taula dosificació formigó calç Pachs

| CHAUX SAINT-ASTIER | | | | CHAUX SAINT-ASTIER | | | |
|--------------------|-------|-----|-----|--------------------|------|-----|------|
| % | 5% | 10% | 15% | % | 5% | 10% | 15% |
| Calç | 2,25l | 3l | 9l | Calç | 1,5l | 3l | 4,5l |
| Grava | 45l | 30l | 60l | Terra | 30l | | |

Taula 30: Taula dosificació formigó calç Saint-Astier

Inicialment es va voler fer una barreja en la dosificació de l'àrid, essent 2 d'àrid grava, 2 de terra i 1 de calç, per tal de poder estudiar aquesta barreja, a més a més de les provetes amb grava i terra. En aquest cas, es va utilitzar únicament la calç Saint-Astier.

8.2.1.2 Amassat del formigó

Durant aquest procés es va tenir en compte les condicions que es poden localitzar a obra, es a dir, no tenir una balança de precisió per tal de poder mesurar grava o terra ni aigua, per aquesta raó es va realitzar el procés a palades. En qualsevol cas, la barreja de cada lot es realitzarà mecànicament per mitjà d'una formigonera, en el cas del formigó amb grava, mentre que va ser manual amb el formigó amb terra.

El procediment de l'amassat del formigó amb grava és el següent:

1. S'aboca l'aigua i la grava/terra dins la formigonera que es troba en funcionament.
2. Una vegada ha entrat en contacte l'aigua i la grava/terra s'afegeix regularment la calç.
3. La formigonera es manté en funcionament a una velocitat constant i es va afegint més aigua tenint en compte que mantingui una massa unificada entre els elements, ni molt líquida ni molt seca.

Pel que fa al procediment de l'amassat amb terra és el mateix, però amb la diferència de que no s'ha emprat una formigonera sinó s'ha fet la barreja manualment. En qualsevol cas, el procés el mateix.



Figura 29: Amassat manual del formigó amb terra

8.2.2 Preparació de les provetes d'assaig

8.2.2.1 Mides de les provetes

8.2.2.1.1 Mides provetes cúbiques

Per a cada forma de proveta d'assaig, la dimensió principal d s'hauria d'escollir per tal de que sigui, com a mínim, tres vegades i mitja la mida nominal de l'àrid del formigó.

Les dimensions designades, es a dir, la dimensió de la proveta en mil·límetres dins del rang permès de dimensions nominals, no haurà de diferir d'aquestes. En el cas de les provetes cúbiques, les dimensions nominals corresponen a les de la imatge següent.

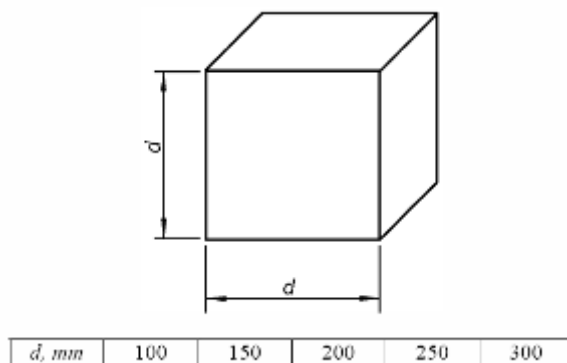


Figura 30: Dimensions nominals de proveta cúbica

Tret que les provetes tinguin documentació que demostrï que s'han fabricat en motlles calibrats s'haurà de mesurar la seva conformitat segons el citat anteriorment. Si tenen documentació s'hauran de comprovar les exigències de les toleràncies.

Cal tenir en compte un seguit de toleràncies de les provetes cúbiques, com són les següents:

- La tolerància de la distància entre les cares modelades respecte a la dimensió designada (d) haurà de ser menor a $\pm 0,5\%$.
- La tolerància de la distància entre la cara d'omplert i la cara modelada del fons respecte a la dimensió designada ha de ser menor de $\pm 1,0\%$.
- La tolerància en la superfície plana de les cares en les que potencialment s'aplicarà la càrrega ha de ser menor de $\pm 0,0006d$, en mil·límetres.
- La tolerància en la perpendicularitat de es cares del cub, amb referència a la base, serà inferior de 0,5 mm.

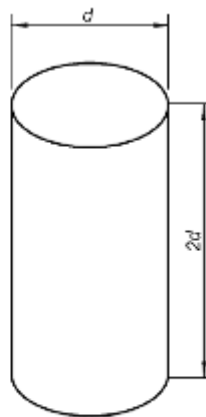
Segons la norma UNE-EN 12390-2, es detallarà la fabricació i el curat de les provetes per l'assaig de resistència, tenint en compte l'anterior.



Figura 31: Provetes cúbiques estudiades

8.2.2.1.2 Mides provetes cilíndriques

Com a les provetes cúbiques, a cada forma de proveta d'assaig, la dimensió principal d s'hauria d'escollir per tal de que sigui, com a mínim, tres vegades i mitja la mida nominal de l'àrid del formigó.



| d, mm | 100 | 113 ^a | 150 | 200 | 250 | 300 |
|--|-----|------------------|-----|-----|-----|-----|
| ^a Esta dimensión presenta una superficie de carga de 10 000 mm ² | | | | | | |

Figura 32: Dimensions nominals de proveta cilíndrica

De la mateixa forma, tret que les provetes tinguin documentació que demostrï que s'han fabricat en motlles calibrats s'haurà de mesurar la seva conformitat segons el citat anteriorment. Si tenen documentació s'hauran de comprovar les exigències de les toleràncies.

En aquest tipus de provetes, les toleràncies es corresponen a les següents:

- La tolerància en el diàmetre designat (d), és de $\pm 0,5\%$.
- La tolerància en la cara plana de les superfícies de càrrega és $\pm 0,0006d$, en mil·límetres.
- La tolerància en la perpendicularitat de les generatrius del cilindre, en referència a les cares, és $\pm 0,5$ mm.
- La tolerància en l'alçada ($2d$) és $\pm 5\%$.

En aquest estudi, les mides de les provetes cilíndriques van ser en alçada més petites que les descrites ja que es corresponien en alçada el mateix que el diàmetre. De la mateixa manera, aquests motlles estan calibrats com la resta, simplement varia l'alçada.



Figura 33: Provetes cilíndriques estudiades

8.2.2.2 Emmotllat de les provetes

En el cas de les provetes de formigó de calç aquestes són cúbiques o cilíndriques i no prismàtiques a diferència de les provetes de morter de calç.



Figura 34: Procediment d'emmotllat de les provetes cilíndriques

8.2.2.2.1 Motlles cúbics

Les provetes emprades en formigó de calç amb grava han estat les provetes cúbiques de 20x20x20 i de 15x15x15. Pel que fa a les dosificacions, s'ha treballat amb 1:4 i la quantitat d'aigua la tindrem en compte segons l'assentament del con d'Abrams.



Figura 35: Provetes 15x15x15



Figura 36: Provetes 20x20x20

Els motlles han de ser estancs i no absorbents. Els que siguin diferents als motlles calibrats definits a continuació, es poden fabricar amb qualsevol material que sigui adient per la confecció de provetes de formigó.



Figura 37: Motlle de cautxú



Figura 38: Motlle d'acer

S'entén per “motlles calibrats”, aquells que es fabricaran en acer o fosa, sent aquests els materials de referència. Si es fabriquen amb altres materials, s'hauran de fer proves mitjançant provetes que demostrin la equivalència al llarg del temps amb provetes realitzades en motlles d'acer o fosa. Totes les parts d'un motlle calibrat hauran de ser suficientment robustes per evitar qualsevol deformació en el muntatge i en l'ús.

Els components dels motlles, amb la possible excepció del plat de la base, han de tenir marques d'identificació.

Els motlles calibrats per la fabricació de provetes cúbiques han de tenir unes característiques concretes, com:

- Els motlles hauran de ser adients per fabricar provetes que compleixin les dimensions nominals i les designades.
- La tolerància en la dimensió designada (d) d'un motlle muntat es de $\pm 0,25\%$.
- La tolerància de la superfície plana de les quatre cares del motlle haurà de ser $\pm 0,0003d$ per motlles nous i de $\pm 0,0005d$ per a motlles utilitzats anteriorment.

- La tolerància de superfície plana de la cara superior del plat de la base del motlle haurà de ser $\pm 0,0006d$ pels motlles nous i de $\pm 0,0010d$ pels motlles utilitzats.
- La tolerància en la perpendicularitat de les cares del motlle respecte a les adjacents i la de les cares respecte a la base serà de $\pm 0,0005$ mm.

8.2.2.2.2 Motlles cilíndrics

Les provetes emprades en formigó de calç amb terra han estat les provetes cilíndriques de diàmetre 15. Pel que fa a les dosificacions, s'ha treballat amb 1:4 i l'aigua s'ha dosificat segons la mostra agafada de la barreja realitzada amb la formigonera.



Figura 39: Provetes diàmetre 15

Els motlles han de ser estancs i no absorbents. Els que siguin diferents als motlles calibrats definits a continuació, es poden fabricar amb qualsevol material que sigui adient per la confecció de provetes de formigó.



Figura 40: Motlle d'acer

S'entén per “motlles calibrats”, aquells que es fabricaran en acer o fosa, sent aquests els materials de referència. Totes les parts d'un motlle calibrat hauran de ser suficientment robustes per evitar qualsevol deformació en el muntatge, en l'ús i en el desmuntatge.

Els components dels motlles, amb la possible excepció del plat de la base, han de tenir marques d'identificació per tal d'un correcte muntatge.

Els motlles calibrats per la fabricació de provetes cilíndriques tenen característiques, com:

- Els motlles hauran de ser adients per fabricar provetes que compleixin les dimensions nominals i les designades.
- La tolerància en el diàmetre designat (d) i l'alçada designada ($2d$) és de $\pm 0,25\%$.
- La tolerància de la superfície plana de la cara superior de la base del motlle haurà de ser $\pm 0,0003d$ per motlles nous i de $\pm 0,0005d$ per a motlles utilitzats anteriorment.
- La tolerància en la perpendicularitat del costat del motlle respecte a la base és de $\pm 0,5$ mm.

8.2.3 Condicionament de les provetes

8.2.3.1 Desemmotllat de les provetes

No s'hauran de fer malbé les provetes a l'hora de desemmotllar. Per tal de desemmotllar es pot emprar martells de plàstic o de goma o bé altres estris especials. Pels assajos a 24h, el desemmotllat es realitzarà com a màxim, 20 minuts abans d'assajar les provetes. Pels assajos superiors a 24h, el desemmotllat es realitzarà entre 20h y 24h després.

Es podrà desemmotllar 24h més tard sempre que la calç no hagi d'adquirir la resistència suficient per ser manipulat sense cap risc de mal. Cal anotar aquest retard del desemmotllat.



Figura 41: Desemmotllat de provetes cúbiques i cilíndriques

8.2.3.2 Edat de les provetes pels assajos de resistències mecàniques

Es calcula la edat de les provetes a partir de el "temps zero" i es realitzen els assajos de resistència a les diferents edats segons els límits següents:

| |
|-------------------------|
| 24h \pm 15 min |
| 48h \pm 30 min |
| 72h \pm 45 min |
| 7 dies \pm 2h |
| \geq 28 dies \pm 8h |

S'ha estudiat al laboratori el comportament de les provetes a 28 dies i 56 dies tenint en compte aquesta limitació temporal.

8.2.3.3 Ambient del local d'emmagatzematge

Per l'emmagatzematge de les provetes, aquestes es troben en un local tancat i amb un ambient estable pel que fa a humitat i temperatura, juntament amb la resta de provetes. Aquestes dades han estat controlades amb un aparell específic, Logger 177-H1 de Testo, durant tot el procés de fabricació.

Tant la humitat com la temperatura no mostren un grau constant en alguns moments, degut a que s'estava fabricant i/o manipulant els morters de calç, dins el local. Però, tret d'aquests moments, es pot apreciar uniformitat.

8.3 Assajos

8.3.1 Assaig de consistència

La norma UNE-EN 12350-2:2006 especifica el mètode per determinar la consistència del formigó fresc per mitjà de l'assaig d'assentament, també anomenat mètode del Con d'Abrams.



Figura 42: Aparell emprat pel mètode del con d'Abrams

L'assaig de consistència presenta importants punts a tenir en compte, com:

- L'assaig d'assentament és sensible als canvis en la consistència del morter quan la mida de l'assentament es situa entre 10 mm i 200 mm. Més enllà d'aquests valors extrems, la medició de l'assentament pot ser inadequada i s'hauria de considerar altres mètodes de mesura de la consistència.
- L'assaig no es adequat si l'assentament continua produint-se passat el minut del desemmotllat.
- L'assaig no es aplicable quan la mida màxima de l'àrid és major que 40 mm.

Breument, l'assaig consisteix en que el morter fresc es compacta en un motlle en forma de tronc de con i en el moment que el motlle es treu, aixecant-lo en direcció vertical, el descens produït per l'assentament del morter dona una mida de la seva consistència.

8.3.1.1 Aparells

1. **Motlle per conformar la proveta d'assaig**, fabricat amb metall que no sigui fàcilment atacable pel morter i d'un espessor no inferior a 1,5 mm. L'interior del motlle ha de ser llis i lliure de protuberàncies, i tampoc ha de presentar cap tipus de cop. El motlle ha de tenir forma de tronc de con amb les dimensions interiors (con d'Abrahams):

| | |
|-------------------------------------|--------------------------|
| Diàmetre de la base | $(200 \pm 2) \text{ mm}$ |
| Diàmetre de la part superior | $(100 \pm 2) \text{ mm}$ |
| Alçada | $(300 \pm 2) \text{ mm}$ |

La base i la part superior han d'estar obertes i ha de ser paral·leles entre si, formant un angle recte amb l'eix del con d'Abrahams. El motlle ha d'estar proveït, en la part superior, de dues anses, i a la part inferior de dues grapes de fixació o peces fixes de peu per sostenir-lo fermament.

2. **Barra compactadora**, de secció transversal circular, recta, fabricada amb acer, amb un diàmetre de $(16 \pm 1) \text{ mm}$, i de $(600 \pm 5) \text{ mm}$ de longitud, i amb els extrems arrodonits.
3. **Tolva d'omplert (opcional)**, fabricada amb material no absorbent i no fàcilment atacable per la pasta de ciment i proveïda d'un collarí que li permeti unir-se a la part superior del motlle.
4. **Regle**, graduat de 0 mm a 300 mm, amb divisions no superiors a 5 mm, i amb el punt de zero en un dels extrems del mateix.
5. **Safata de base**, una placa rígida, plana, no absorbent, o una altra superfície on es pugui col·locar el motlle.
6. **Recipient de reamassat**, una safata plana de construcció rígida i fabricada amb materials no absorbents ni fàcilment atacables per la pasta de morter. Han de tenir les dimensions apropiades per a que el morter es pugui homogeneïtzar perfectament amb la pala quadrada.
7. **Pala**, amb la boca quadrada. Aquesta, és necessària per assegurar un perfecte amassat del material en el recipient de reamassat.
8. **Drap humit**
9. **Recollidor**, de 100 mm de amplada aproximadament.
10. **Cronòmetre** o rellotge que permeti la apreciació de 1 s.

8.3.1.2 Procediment de l'assaig

1. Cal humitejar el motlle i la safata base, i es col·loca el motlle sobre la safata base en una superfície horitzontal. Durant el procés d'omplert es subjecta el motlle fermament contra la safata base, ja sigui ancorant-lo perfectament o bé pressionant sobre les peces de peu.

2. S'omple el motlle en tres capes, ocupant cadascuna un terç de l'alçada del motlle. Es compacta cada capa amb 25 cops amb una barra compactadora. Es distribueixen uniformement els cops en la secció transversal de cada capa.
3. Per la capa inferior s'haurà d'inclinar lleugerament la barra compactadora i posicionar la meitat dels cops aproximadament en forma d'espiral cap al centre. Es compacta la segona i l'última capa en tota la seva alçada, de forma que la barra penetri lleugerament a la capa inferior. En l'ompliment i compactament de la última capa, es procurarà que el morter desbordi abans de començar el procés de compactació.

Si com a conseqüència del procés de compactació de l'última capa resulta que manca morter i per tant es troba per sota del nivell superior del motlle, s'afegirà morter per tal que excedeixi sobre el nivell superior del motlle. Després de compactar l'última capa, es retirarà el morter sobrant per mitjà d'una acció de tall i rodet de la barra compactadora.

4. Es retira el morter sobrant de la superfície o la placa base. Es retirarà el motlle aixecant-lo amb cura verticalment. L'acció d'aixecada del motlle s'ha de realitzar en un temps de 5 a 10 segons, de manera uniforme, sense causar al morter cap tipus de moviment lateral o de torsió.
5. L'operació complerta, començant per l'ompliment del motlle fins la retirada del mateix, serà realitzat sense cap interrupció i ha de completar-se en un temps no superior als 150 segons.
6. Seguidament després de retirar el motlle, es mesura i es registra l'assentament (h) determinant la diferència entre l'alçada del motlle i la del punt més alt de la proveta de morter assentada.

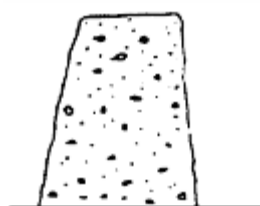
8.3.1.3 Resultats

L'assaig únicament és vàlid si es produeix un correcte assentament de la massa del morter, es a dir, un assentament on el morter es mantingui substancialment intacte i de forma simètrica com es mostra en la figura 10 (a).

Si es produeix una caiguda lateral de la mostra, como es mostra en la figura 10 (b), s'haurà de prendre una nova mostra i repetir el procediment.

Si dos assajos consecutius mostren que una part del morter es desprèn de la massa de la proveta d'assaig, el morter no posseeix la necessària plasticitat i cohesió per que el assaig de consistència sigui adient.

Es registra el assentament vàlid (h), com es mostra en la figura 11, arrodonit als 10 mm.



(a) Assentament simètric



(b) Assentament esbiaixat

Figura 43: Formes d'assentament

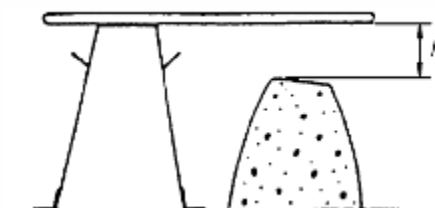


Figura 44: Mesura de l'assentament

Les diferents consistències i els valors límit de l'assentament del con d'Abrams, seran els següents, segons marca la EHE08:

| Consistència definida pel seu tipus | | |
|---|-----------------|--------------------|
| Tipus de consistència | Tolerància (cm) | Interval resultant |
| Seca (S) | 0 | 0 – 2 |
| Plàstica (P) | ± 1 | 2 – 6 |
| Tova (B) | ± 1 | 5 – 10 |
| Fluida (F) | ± 2 | 8 – 17 |
| Líquida (L) | ± 2 | 14 – 22 |
| Consistència definida pel seu assentament | | |
| Assentament (cm) | Tolerància (cm) | Interval resultant |
| Entre 0 – 2 | ± 1 | $A \pm 1$ |
| Entre 3 – 7 | ± 2 | $A \pm 2$ |
| Entre 8 – 12 | ± 3 | $A \pm 3$ |
| Entre 13 – 18 | ± 3 | $A \pm 3$ |

Taula 31: Consistència segons assentament del con d'Abrams

Tret en aplicacions específiques que així ho requereixin, s'evitarà emprar consistències seques i plàstiques. No es podrà emprar la consistència líquida, tret que s'aconsegueixi mitjançant additius superplastificants.

Una vegada formigonada la barreja es va mesurar el Con d'Abrams que presentava la mostra de la manera següent, obtenint una consistència de 8 cm, com es mostra a continuació:



Figura 45: Mesura de l'assentament de la mostra

L'aigua emprada en aquest assaig, es va determinar a partir d'unes mostres agafades del formigó emprat i durant 24h va situar-se la mostra a altes temperatures per tal de poder obtenir la diferència de pes i així obtenir la quantitat d'aigua que s'havia afegit.



Figura 46: Mostres del formigó elaborat amb calç

D'aquesta manera, els resultats obtinguts han estat els següents:

| Sèria 1 | | | Sèria 1 | | |
|--------------|-------|---------|--------------|--------|---------|
| Pascual | | | Saint-Astier | | |
| Con d'Abrams | 7 | | Con d'Abrams | 9 | |
| Aigua | 40,05 | 10,30 % | Aigua | 38,62 | 8,69 % |
| Àrid + Calç | 348,7 | 89,70 % | Àrid + Calç | 406,03 | 91,31 % |

| Sèria 2 | | | Sèria 2 | | |
|--------------|--------|---------|--------------|--------|---------|
| Pascual | | | Saint-Astier | | |
| Con d'Abrams | 10 | | Con d'Abrams | 7 | |
| Aigua | 34,17 | 10,69 % | Aigua | 31,61 | 8,84 % |
| Àrid + Calç | 285,33 | 89,31 % | Àrid + Calç | 325,81 | 91,16 % |

| Sèria 3 | | | Sèria 3 | | |
|--------------|--------|---------|--------------|--------|---------|
| Pascual | | | Saint-Astier | | |
| Con d'Abrams | 8 | | Con d'Abrams | 7 | |
| Aigua | 31,91 | 10,15 % | Aigua | 23,34 | 8,93 % |
| Àrid + Calç | 282,33 | 89,85 % | Àrid + Calç | 237,95 | 91,07 % |

| Sèria 1 | | |
|--------------|-------|---------|
| Pachs | | |
| Con d'Abrams | 6,5 | |
| Aigua | 34,5 | 9,91 % |
| Àrid + Calç | 313,5 | 90,09 % |

| Sèria 2 | | |
|--------------|-------|---------|
| Pachs | | |
| Con d'Abrams | 7 | |
| Aigua | 37,1 | 9,88 % |
| Àrid + Calç | 338,5 | 90,12 % |

Segons la normativa EHE08 i juntament amb les dades obtingudes, la consistència dels formigons elaborats és de tova, ja que l'assentament mesurat ha estat entre 7 i 10 cm.

8.3.2 Assajos físics. Resistència mecànica. Compressió

8.3.2.1 Aparells

Es descriuen tots els aparells necessaris que la norma UNE-EN corresponent cita:

1. **Motlles** segons la Norma UNE-EN 12390-1.
2. **Tolva d'omplert** (opcional)
3. **Medis de compactació del formigó** (s'emprarà un dels següents mitjans)
 - a. Agulla vibrant, amb una freqüència mínima de 120 Hz (7200 cicles per minut). El diàmetre del vibrador no excedirà de, aproximadament, $\frac{1}{4}$ de la mida més petita de la proveta d'assaig.
 - b. Taula vibrant, amb una freqüència mínima de 40 Hz (2400 cicles per minut).
 - c. Barra compactadora, de secció transversal circular, recta, fabricada d'acer, amb un diàmetre de 16 mm, aproximadament, i d'una longitud aproximada de 600 mm, i amb els seus extrems arrodonits.
 - d. Maça per compactar, recta, fabricada d'acer amb secció transversal quadrada de 25 mm x 25 mm aproximadament, i una longitud de 380 mm, aproximadament.
4. **Recollidor**, de 100 mm d'ample aproximadament.
5. **Dues llanes d'acer**
6. **Recipient de reamassat**, safata plana de construcció rígida i fabricada amb materials no absorbents ni fàcilment atacables per la pasta. Haurien de tenir les mides adequades per a que el formigó pugui homogeneïtzar-se perfectament amb la pala quadrada.
7. **Pala**, amb la boca quadrada.
8. **Material de desencofrat no reactiu**
9. **Maça**

8.3.2.2 Procediment de l'assaig

1. Màquina d'assaig per resistència compressió

Pel que fa a la maquinària emprada, les característiques d'aquesta es corresponen a la maquinària emprada en morters, però les dimensions són diferents i els plats d'anivellament presenten diferències degut a les mides que presenten les provetes. De qualsevol manera, el procediment d'assaig és el mateix.



Figura 47: Màquina d'assaig emprada per l'assaig de resistència a compressió

2. Preparació i ompliment dels motlles

Si s'utilitza una tolva d'omplert, la quantitat de formigó emprat per tal d'omplir els motlles serà tal que una capa romangui a la tolva d'omplert després de la compactació. L'espessor d'aquesta capa oscil·larà entre el 10% i el 20% de l'alçada de la proveta.

Les provetes seran compactades en un mínim de dues capes, però cap capa haurà de tenir un espessor superior a 100 mm.

Abans de l'omplert, s'haurà de cobrir la part interior del motlle amb una pel·lícula de desencofrat no reactiu per evitar que el formigó s'adhereixi al motlle.

3. Preparació i posicionament de les provetes

S'eixuga l'excés d'humitat de la superfície de la proveta abans de posar-la a la màquina d'assajos.

S'eixuga els plats de càrrega de la màquina, eliminant-se qualsevol resta de argila o altre material estrany de les superfícies de la proveta que han d'estar en contacte amb els plats.

No utilitzar l'emalatge, altra cosa que no siguin els plats auxiliars o blocs espaiadors (segons norma UNE-EN 12390-4).

Les provetes cúbiques/cilíndriques s'han de col·locar de tal manera que la càrrega s'apliqui perpendicularment a la direcció del formigonat.

Les provetes han de centrar-se respecte al plat inferior amb una aproximació de $\pm 1\%$ de la mida normalitzada del costat de la proveta cúbica o del diàmetre de la proveta cilíndrica.

Si s'utilitzen plats auxiliars, s'alinearan amb la cara superior i inferior de les provetes.

4. Compactació del formigó

La compactació s'efectuarà immediatament després del vessament del formigó al motlle, de manera tal que s'obtingui una compactació complerta sense una excessiva segregació, ni aparició de flux de lletada en excés.

Cada capa serà compactada per vibració mecànica i manual. Aquest sistema és la compactació realitzada en les provetes de formigó amb terra. El mitjà emprat ha estat una Kangu que distribueix uniformement la terra en tota la superfície de cada capa compactada. Permetrà que s'elimini les bombolles d'aire atrapat, un cop compactada cada capa.



Figura 48: Màquina compactadora emprada per la realització de les provetes

5. Anivellament de la superfície

Si s'empra una tolva d'omplert, aquesta haurà de ser retirada una vegada acabada la compactació.

El formigó residual dipositat sobre el marge superior del motlle serà retirat mitjançant l'ús de dues llandes d'acer mitjançant una acció de vaivé i posterior anivellació curosa de la superfície.

6. Marcat

Les provetes es marcaran de manera clara i duradora, sense fer-les malbé. Les anotacions efectuades es conservaran a fi d'assegurar la traçabilitat de la mostra des de la presa fins l'assaig.

7. Curat de les provetes d'assaig

Les provetes es mantindran al motlle durant 16 hores com a mínim, però no més de tres dies, protegides d'impactes, vibracions i deshidratació, a una temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Després de retirar les provetes dels motlles, curar-les fins immediatament abans de l'assaig, ja sigui en aigua o una temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, o en una cambra a $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ i a una humitat relativa $\geq 95\%$.

Una vegada formigonat, les dosificacions emprades en cada calç són diferents, principalment la quantitat d'aigua, que s'obtindrà la seva dada a partir de l'assaig del Con d'Abrams, descrit a la pàgina 79 d'aquest document.

8. Càrrega

Es selecciona una velocitat de càrrega constant dins els rang de 0,2 MPa/s (N/mm²·s) a 1,0 MPa/s (N/mm²·s).

S'aplica la càrrega a la proveta sense cop i s'incrementa contínuament, a la velocitat seleccionada $\pm 10\%$, fins que no pugui suportar més càrrega.

9. Valoració del tipus de ruptura

Depenen del resultat de l'assaig s'obtindrà una ruptura satisfactòria o no, segons els exemples següents, ja sigui en provetes cúbiques, com cilíndriques.

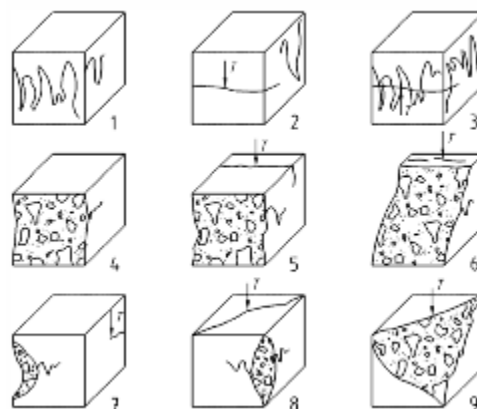
Les ruptures no satisfactòries poden ser causades per:

- Atenció insuficient en els procediments d'assaig, especialment en el posicionament de les provetes.
- Alguna errada de la màquina d'assaig.



NOTA - Les quatre cares exposades es trenquen aproximadament igual, generalment amb una mica de mal en les queres que es troben en contacte amb els plats.

Figura 49: Ruptures satisfactòries en provetes cúbiques



NOTA - T = Línies de ruptura

Figura 50: Ruptures no satisfactòries en provetes cúbiques



Figura 51: Ruptures satisfactòries en provetes cilíndriques

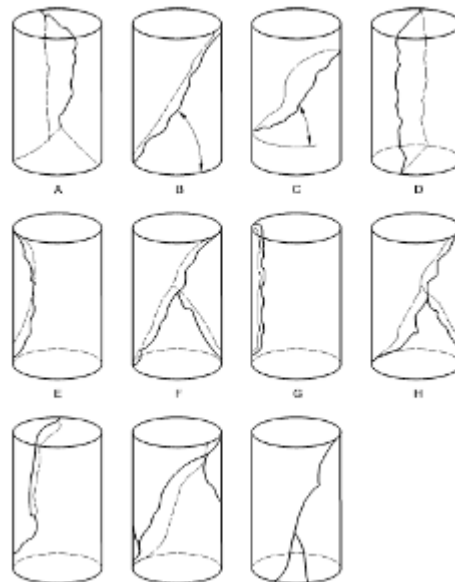


Figura 52: Ruptures no satisfactòries en provetes cilíndriques

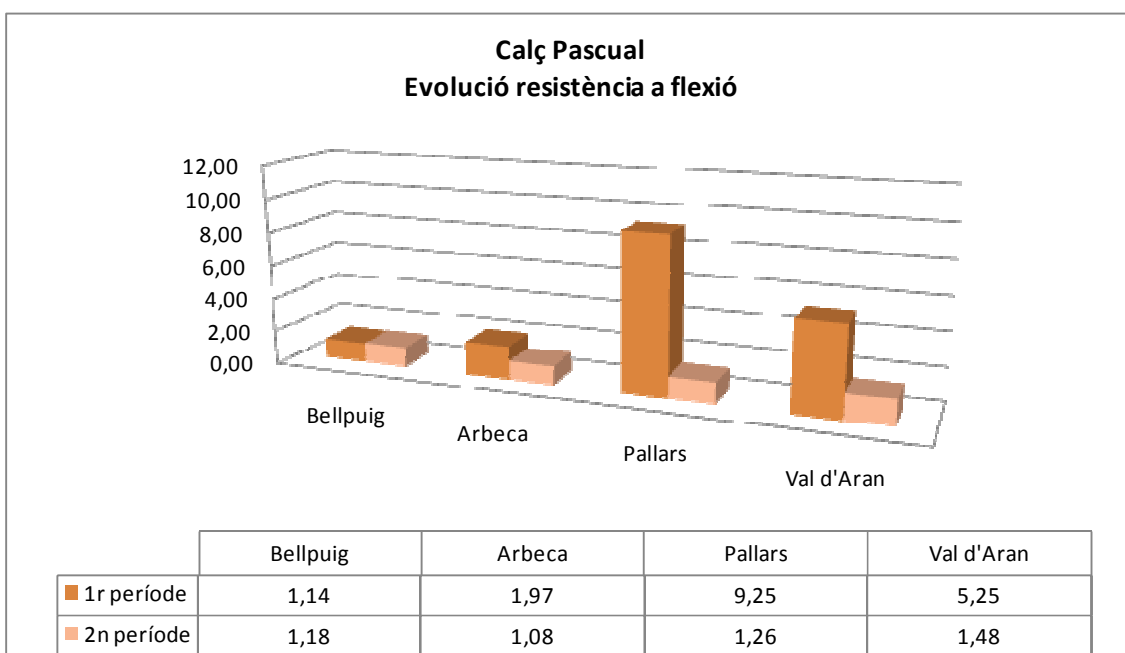
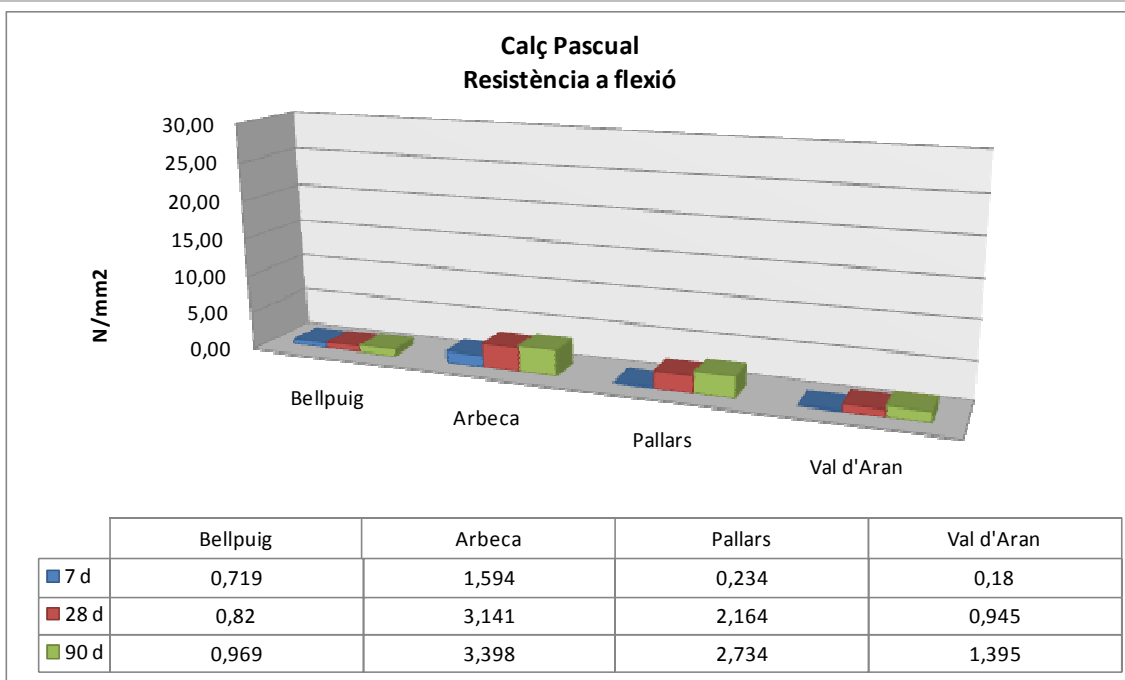


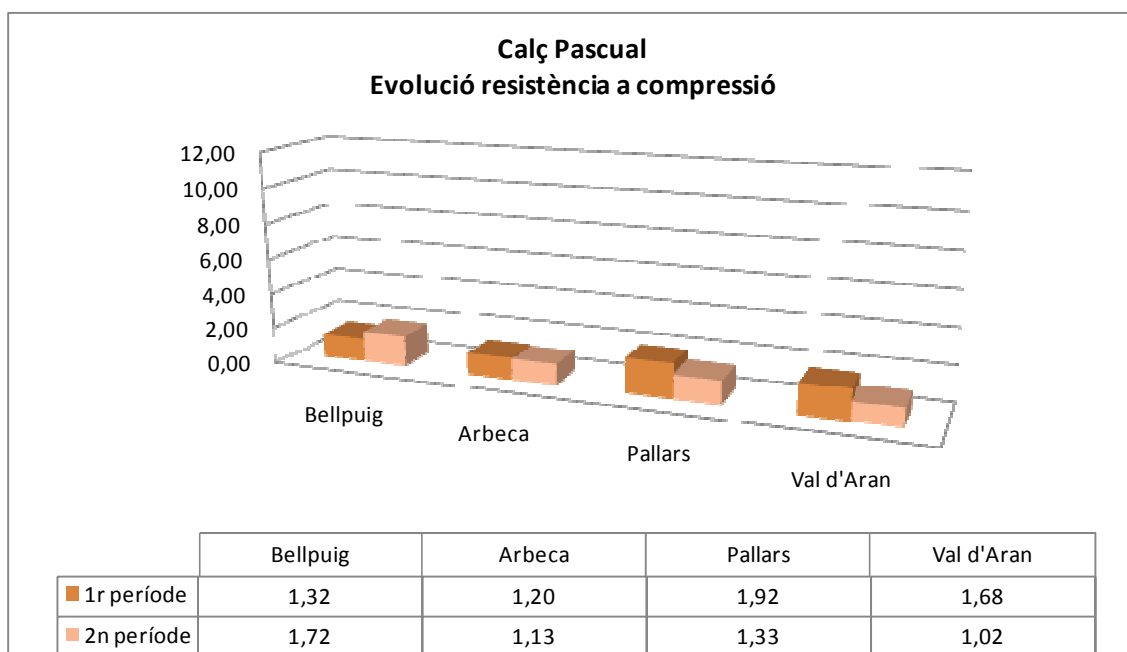
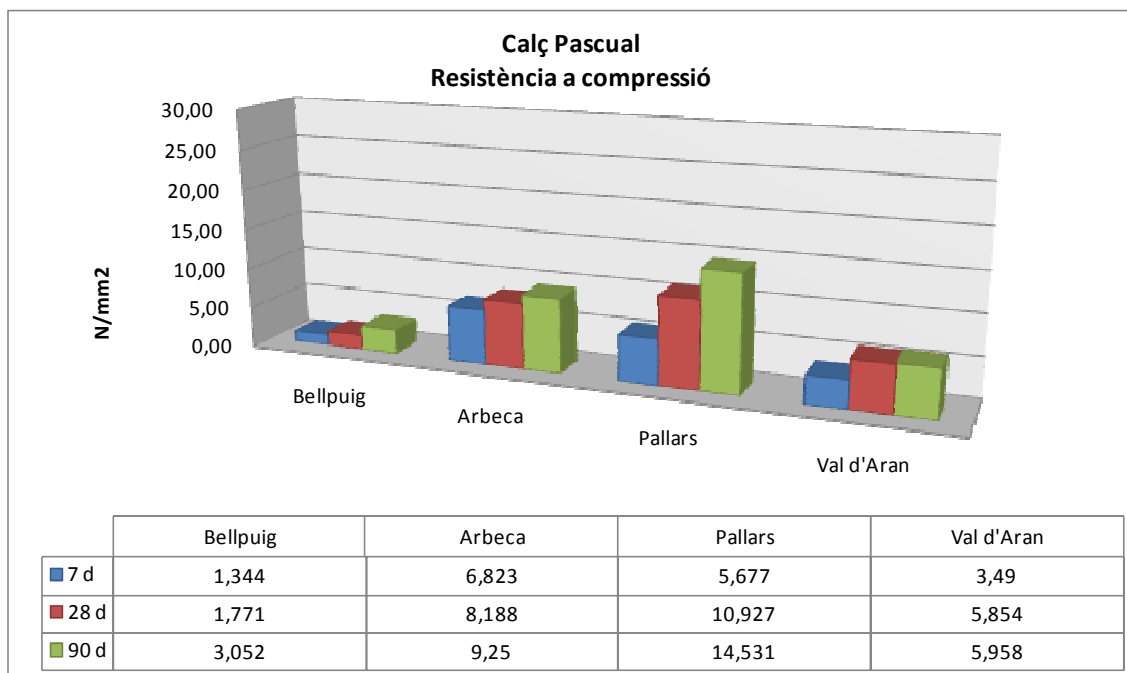
Figura 53: Ruptura satisfactòria en proveta cúbica i cilíndrica assajada

9. RESULTATS OBTINGUTS, ANÀLISI I DISCUSSIÓ

9.1 Calç Pascual

9.1.1 Morter de calç Pascual





En l'assaig a flexió, s'obté els valors més elevats corresponents a l'arena calcària d'Arbeca, durant les tres edats estudiades, que es diferencien considerablement amb la resta de valors, i on la seva evolució durant el primer període és gairebé del doble, mentre que en el segon és manté en la mateixa resistència que a 28d pràcticament tot i augmentar en menor mesura. I per altra banda, la resta de valors són resistències baixes en les tres edats però amb anotacions particulars com:



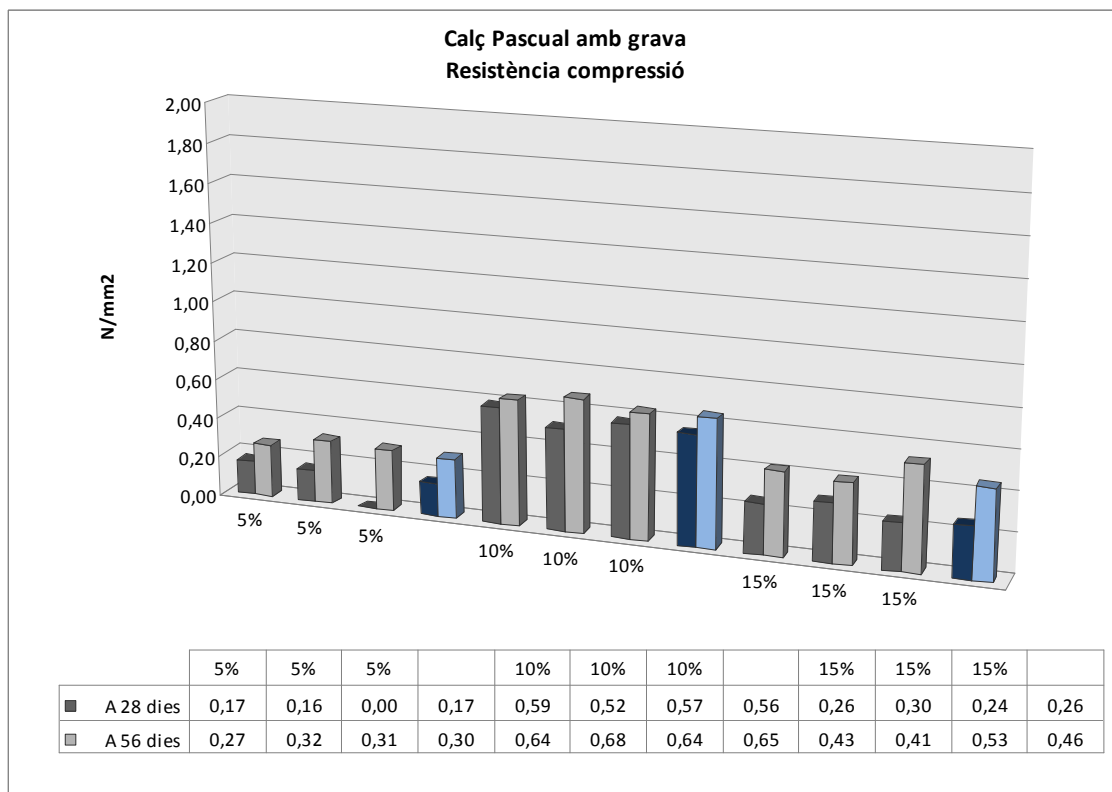
- La calç Pascual amb l'arena silícica de Bellpuig obté valors baixos i pràcticament uniformes durant els tres períodes. Per tant, la seva evolució entre edats es manté.
- La calç Pascual amb l'arena del Pallars obté valors molt petits a 7 dies, al voltant de $0,2 \text{ N/mm}^2$, però a 28 i 90 dies aquesta resistència augmenta considerablement. La seva evolució, doncs, entre 7 i 28 dies mostra un augment de 9 vegades aproximadament i amb el període següent la resistència augmenta però ens valors semblants als de 28 dies.
- La calç Pascual amb l'arena de la Vall d'Aran obté valors semblants als del Pallars, ja que el valor a 7 dies és molt inferior a la resta, de $0,18 \text{ N/mm}^2$, mentre que a 28 dies el seu augment és important i a 90 dies augmenta però en menor mesura. Per tant, el seu increment durant el primer període augmenta 5 vegades i en el segon període gairebé un 1,5.

En l'assaig a compressió, les resistències assolides són elevades en la majoria, mentre que es veu una diferència important amb l'arena silícica de Bellpuig on les resistències obtingudes són petites. En aquest cas, el primer període no augmenta la resistència considerablement i, en canvi, durant el segon període la resistència augmenta més tot i que no d'una manera important. Per altra banda, l'arena d'Arbeca té una evolució durant els dos períodes d'augment però constants; En canvi, tant l'arena del Pallars com la de la Vall d'Aran augmenta la resistència en el primer període i en el segon pràcticament és el mateix. De qualsevol manera, a compressió, l'arena del Pallars també aporta la millor resistència en les condicions estudiades pel que fa a 28 dies d'edat en endavant, mentre que a edats curtes l'arena calcària d'Arbeca és la que reacciona millor amb la calç Pascual ja que es diferencia en més de 1 N/mm^2 amb la del Pallars.

Es doncs, que a flexió l'arena més favorable per la calç Pascual és l'arena d'Arbeca, mentre que a compressió a edats curtes obté resultats més favorables amb l'arena d'Arbeca, però una vegada augmenta el temps l'arena del Pallars assoleix resistències molt més grans i diferenciades.

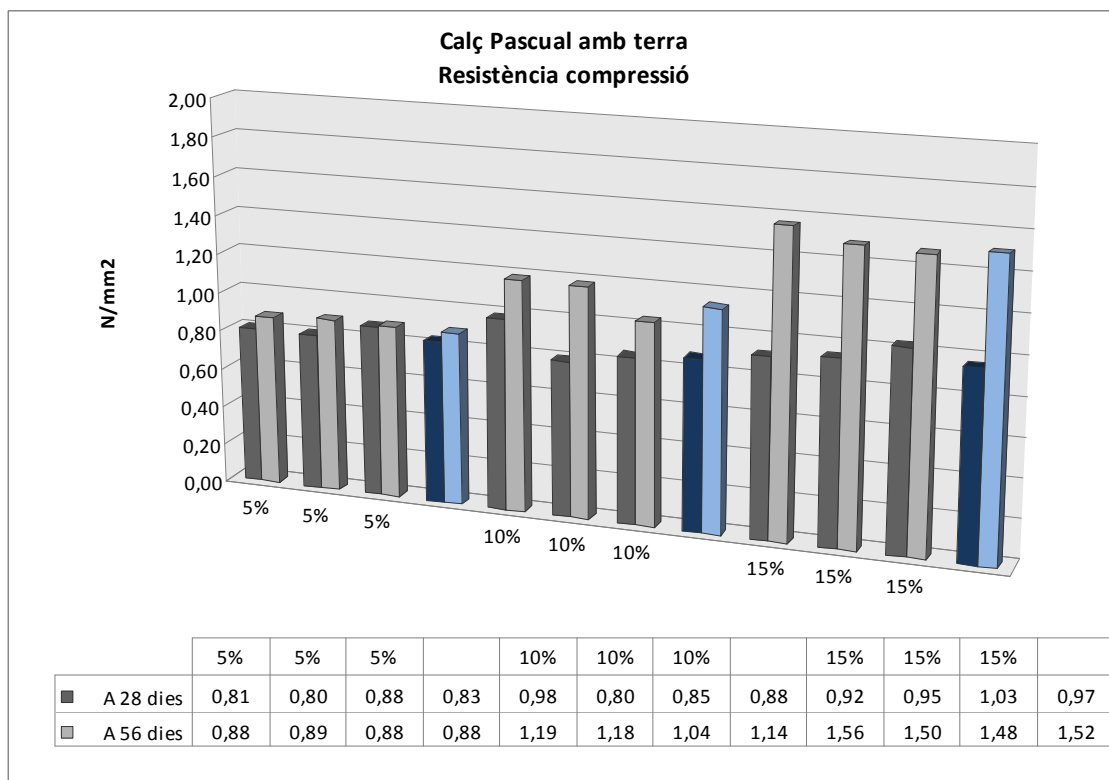
9.1.2 Formigó de calç Pascual

9.1.2.1 Calç Pascual amb grava



Els resultats dels assajos realitzats per la calç Pascual amb grava en les diferents dosificacions es mostren en el gràfic anterior. Es pot observar algun cas on no hi ha resultat degut a que en el desemmotllat la proveta es va trencar, degut a que alguns motlles es desemmotllaven a pressió d'aire i si la proveta no es trobava en un correcte fraguat aquesta es fragmentava. En qualsevol cas, és important la diferència de resultats ja que amb una dosificació del 5% la resistència obtinguda és menor, seguida de la del 15% i per últim, la major resistència s'obté amb un 10% de dosificació. A 28 dies la diferència de resistència és important amb la resta, i tret que a 56 dies també, aquesta no difereix tant amb la dosificació del 15%. De qualsevol manera, a 56 dies, edats llargues, la seva resistència augmenta. Per tant, doncs, la resistència òptima es localitza amb la dosificació del 10%, ja que la resistència a 28 dies supera a la resistència assolida a 56 dies de la resta de dosificacions.

9.1.2.2 Cal Pascual amb terra

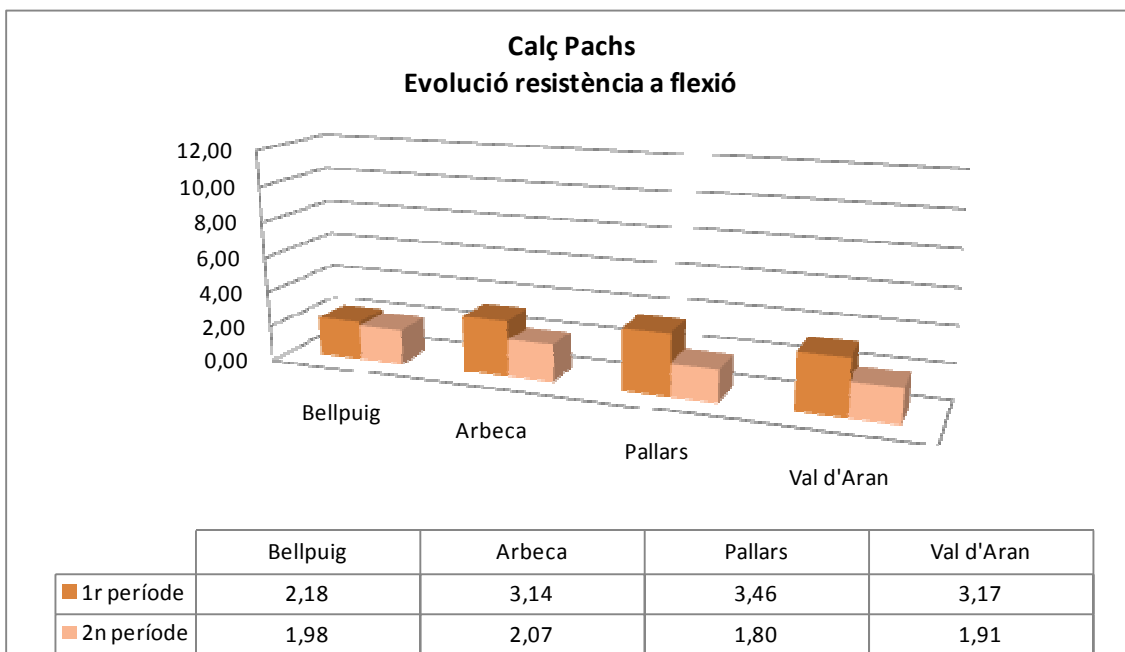
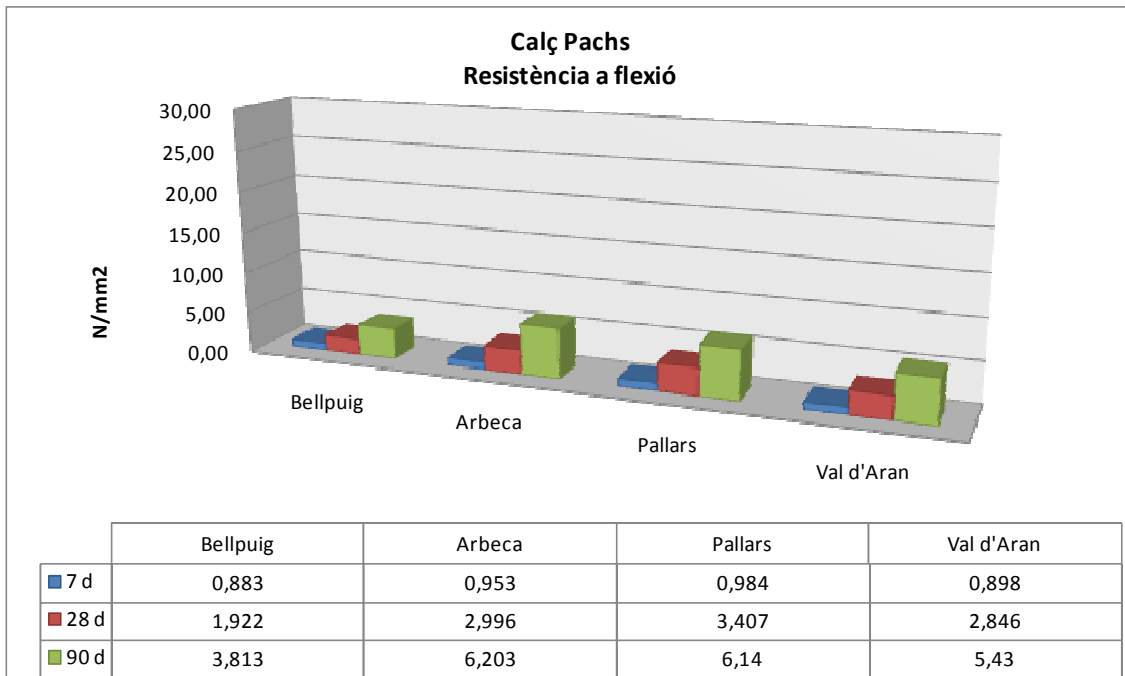


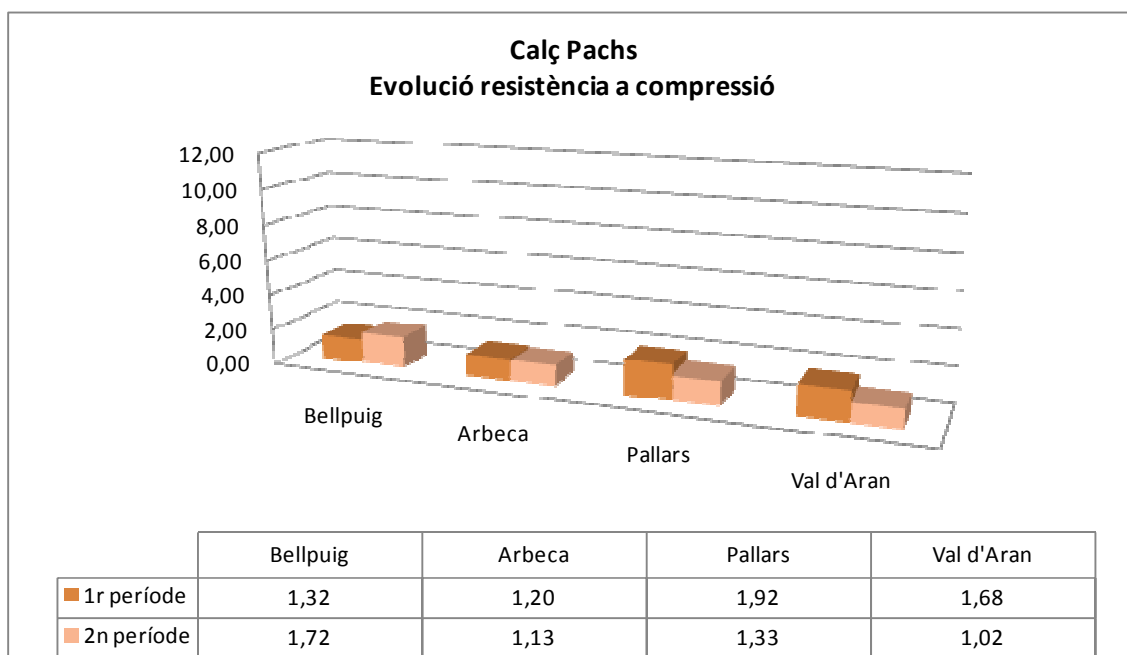
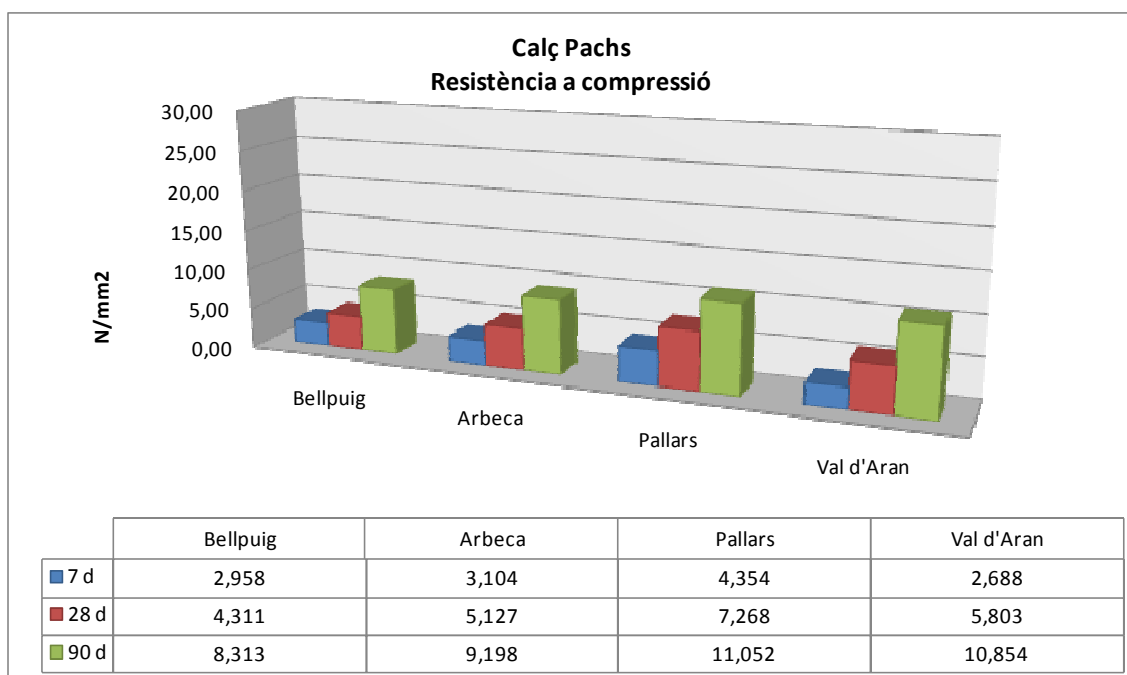
Els resultats obtinguts dels assajos de calç Pascual amb terra es mostren en el gràfic superior. Primerament, cal destacar que els resultats a 28 dies no mostren diferències importants entre les tres dosificacions, però en qualsevol cas amb una dosificació del 15% s'obté una petita millora. Pel que fa a 56 dies, hi ha més canvi entre les dosificacions ja que al 5% la resistència és molt menor que no pas al 15% que pràcticament dobra la seva resistència.

Per tant, doncs, la resistència òptima seria amb una dosificació del 15% si es barreja calç Pascual amb terra.

9.2 Calç Pachs

9.2.1 Morter de calç Pachs





En l'assaig a flexió, s'obté valors molt semblants entre les diferents tipologies d'arena calcària, on els resultats varien entre ells en petita mesura. Però la diferència es troba amb l'arena de Bellpuig ja que únicament té resultats semblants amb la resta a 7 dies, mentre que a 28 i 90 dies la seva resistència és molt menor, de fins a 1 N/mm² a 28 dies o fins a la meitat pràcticament a 90 dies. Per altra banda, dins de l'arena calcària, la de la Vall d'Aran mostra resultats parcialment més baixos que no pas la d'Arbeka o Pallars. És, doncs, l'arena del Pallars la que obté resistències majors a 7 i 28 dies, però a 90 dies la resistència és una mica inferior a la d'Arbeka, tot i que no li treu ni 0,1 N/mm².

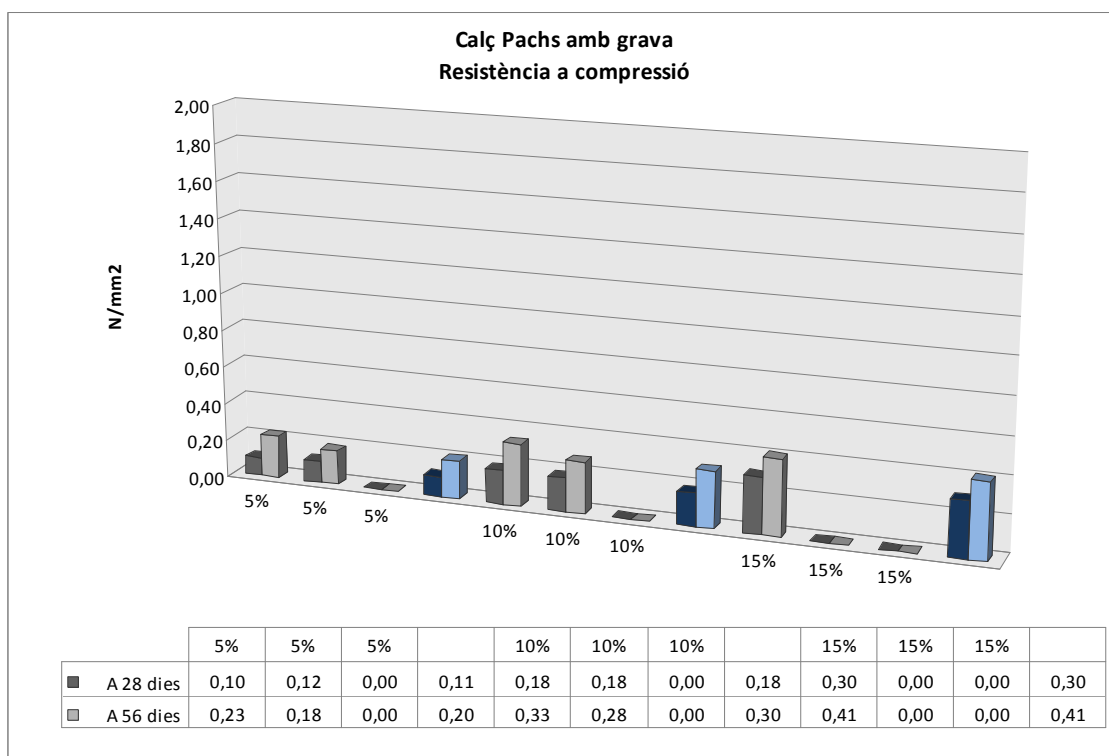
Per tant, obtenim augments de resistència més elevats durant el primer període pel que fa a arena calcària que no pas en el segon període, tot i que aquest últim té un augment considerable. En canvi, l'arena silícica de Bellpuig augmenta de la mateixa manera en els dos períodes.

En l'assaig a compressió, les resistències assolides són variades segons l'arena. En primer lloc, a edats curtes, les resistències són similars però destaca l'arena del Pallars superant a la resta en gairebé 1 N/mm², com també passa a 28 dies que supera en 1,4 N/mm² com a mínim a la resta. A edats llargues, 90 dies, destaquen les arenes del Pallars i Vall d'Aran ja que superen com a mínim en 1 N/mm² a la resta, però entre elles la diferència és mínima. Per tant, i tenint en compte els resultats obtinguts, l'arena de Bellpuig és la que obté menor resistència amb la calç Pachs, mentre que l'arena del Pallars destaca amb la resta en resistència. Pel que fa a evolució, l'arena d'Arbeca augmenta de resistència de la mateixa manera en els dos períodes, mentre que l'arena de Bellpuig augmenta més durant el segon període que no pas el primer a diferència a l'arena del Pallars i de la Vall d'Aran on la resistència augmenta més entre 7 i 28 dies que no pas de 28 a 90 on és manté d'una manera constant.

Es doncs, que tant a flexió com a compressió l'arena més favorable per la calç Pachs és la del Pallars.

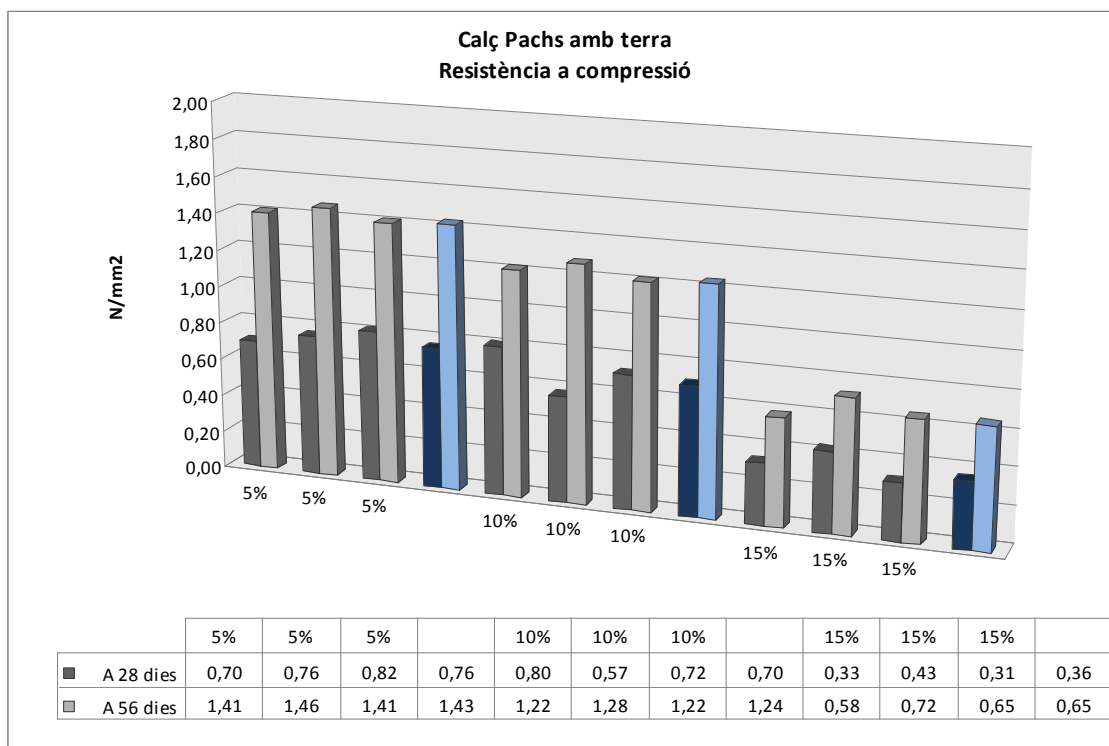
9.2.2 Formigó de calç Pachs

9.2.2.1 Calç Pachs amb grava



La calç Pachs amb grava, on els resultats es mostren en el gràfic superior, assolix uns resultats no gaire fiables degut a l'estat en que es trobaven les provetes en el moment de desemmotllat. En aquest cas, les provetes no van endurir d'una manera òptima provocant que algunes d'elles no poguessin assajar-se. Per tant, tot i que els resultats mostren que la dosificació òptima es mostra en el 15%, aquets valors únicament es corresponen a un assaig realitzat, i per tant, no seria un resultat a tenir en compte fiable. En qualsevol cas, els resultats mostren que en una dosificació del 5% els resultats obtinguts son menors i augmenta si la dosificació també augmenta.

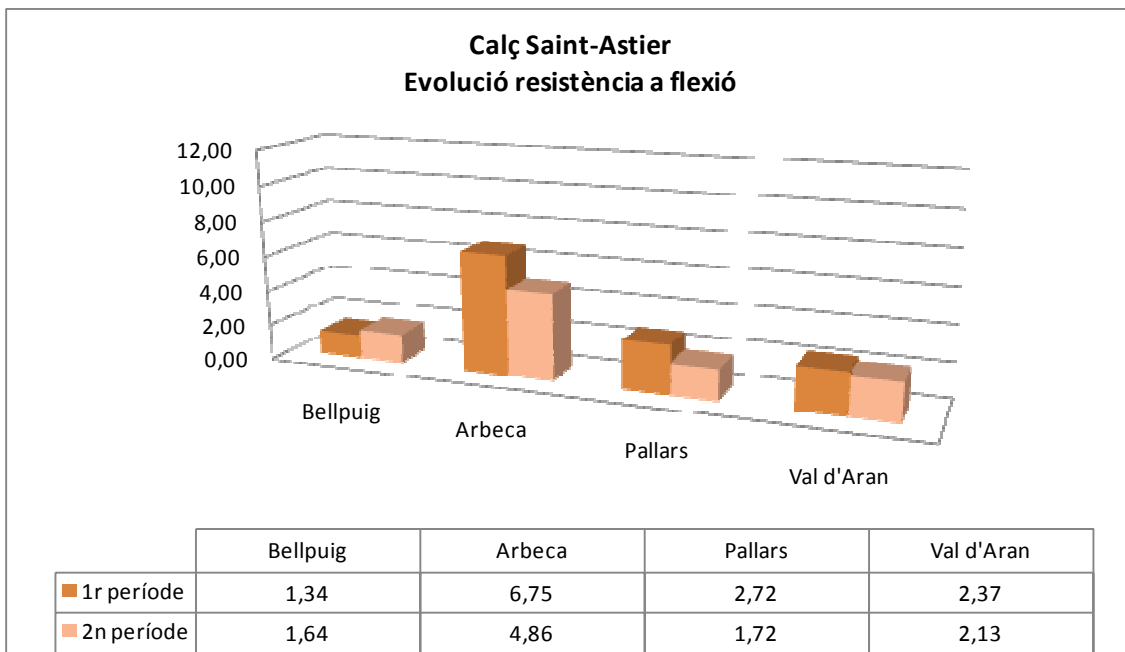
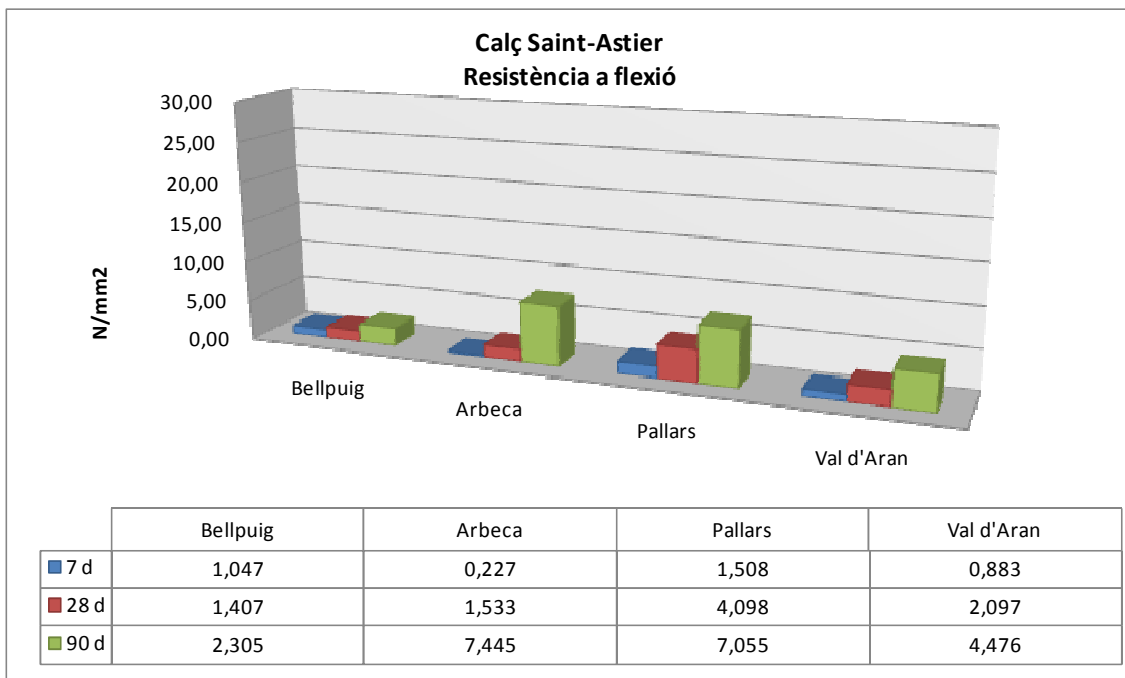
9.2.2.2 Calç Pachs amb terra

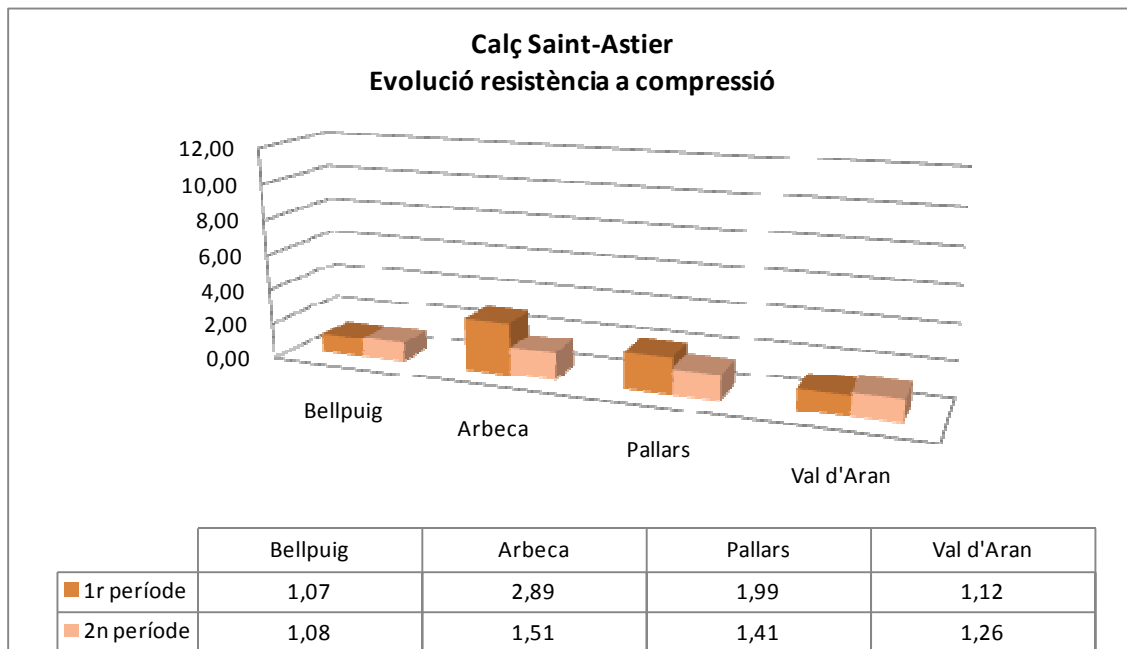
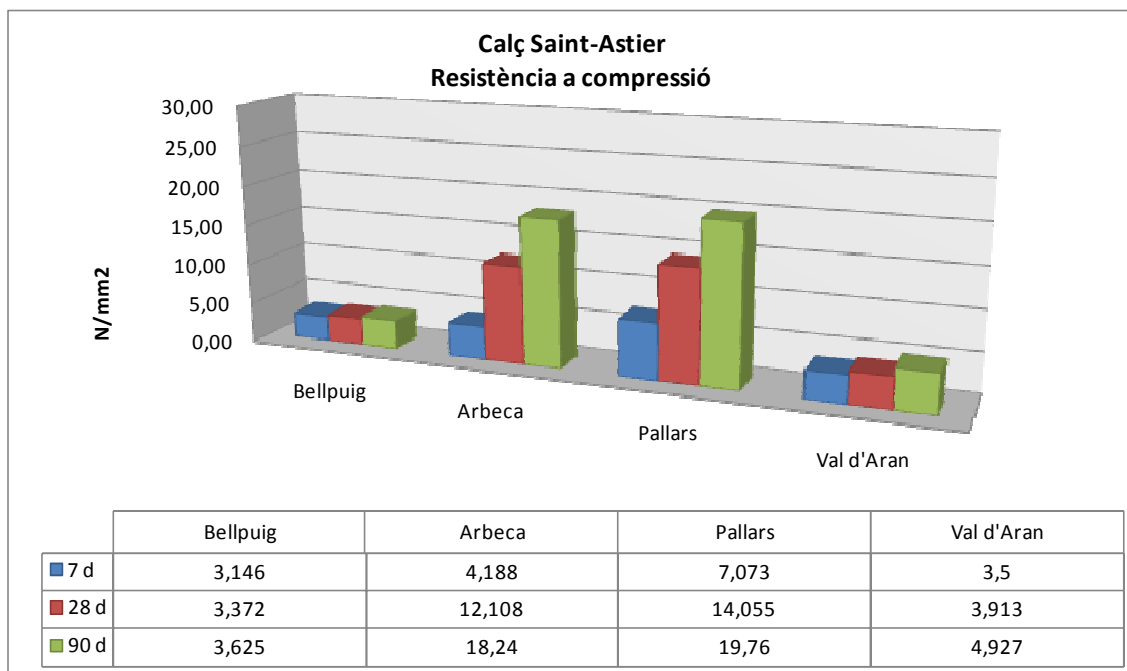


El segon cas estudiat de provetes de formigó de calç Pachs, es mostra anteriorment en el gràfic superior, era amb terra és més favorable que amb grava, tot i que presenta el mateix problema: es mostra un valor òptim dins d'aquests tres d'estudi però no té perquè ser el més favorable ja que no mostra un pic en les dosificacions. Per tant, en aquest cas, la calç Pachs amb terra, reacciona més favorablement en un 5% de dosificació superant els resultats del 10% però no en gaire mesura. La dosificació que es mostra despenjada és la del 15% a diferència que en el cas anterior amb grava, era la inversa, tot i que no es podria tenir en compte. La resistència obtinguda a 56 dies de la dosificació del 15% és el que assolix a 28 dies una proveta ja sigui del 5% o del 10% de dosificació.

9.3 Calç Saint-Astier

9.3.1 Morter de calç Saint-Astier





En l'assaig a flexió, s'obté valors variables en les diferents tipologies d'arenas estudiades:

- L'arena silícica de Bellpuig obté resistències inferiors a la resta pel que fa a edats llargues, sobretot a 90 dies ja que la resistència obtinguda és de 2 N/mm² amb la següent. A 7 dies la resistència obtinguda és de les altes, però a 28 dies, obté dels resultats inferiors juntament amb l'arena calcària

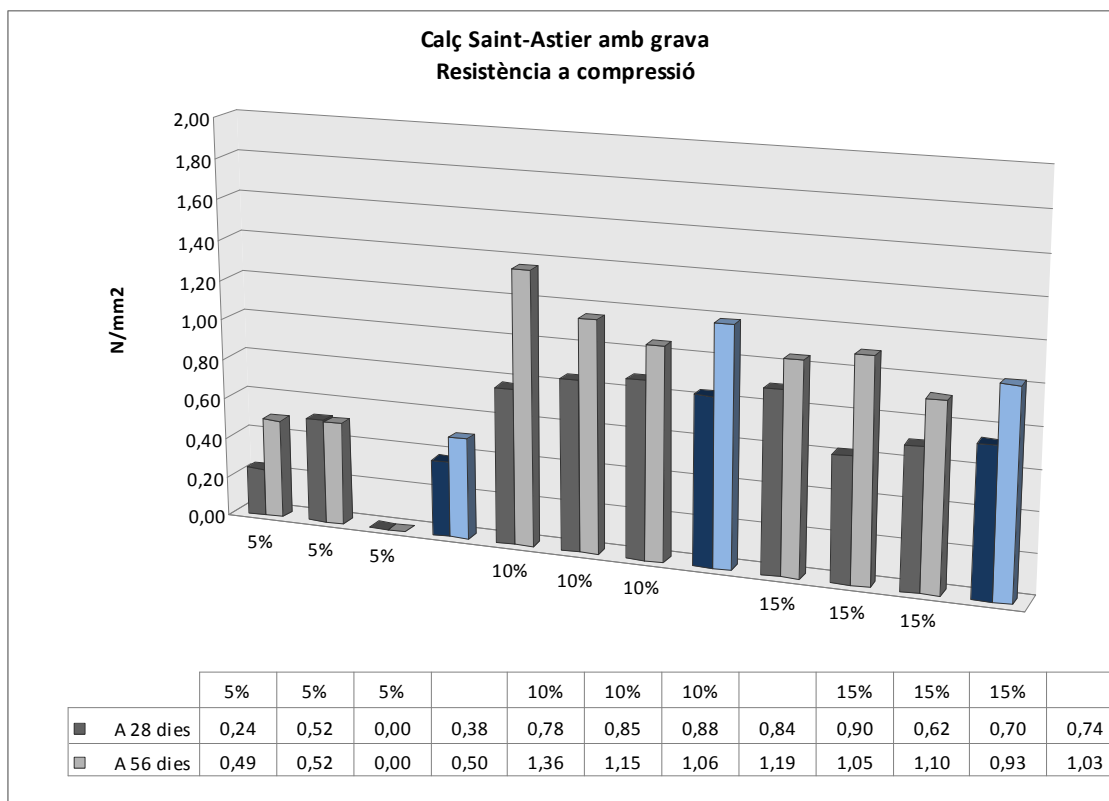
- d'Arbeca. De qualsevol manera, la seva evolució en els dos períodes és manté constant tot i que augmenta mínimament més en el segon.
- L'arena de la Vall d'Aran obté resultats semblants als de l'arena de Bellpuig però una mica majors pel que fa a 28 i 90 dies, ja que a 7 dies la resistència encara és més petita. La seva evolució augmenta en els dos períodes molt però, en qualsevol cas, d'una manera constant en ambdós casos.
 - L'arena d'Arbeca obté els resultats més baixos a edats curtes, 7 dies, i a 28 dies però en canvi a 90 dies s'obtenen els resultats més favorables per aquesta calç, destacant amb l'arena del Pallars en més de $2,5 \text{ N/mm}^2$. Destacar, que és l'arena on la seva evolució destaca en relació amb la resta, ja que creix molt més en el primer període que en segons, però en ambdós casos d'una manera destacable en relació amb la resta.
 - L'arena del Pallars és la que té millor resistència a 7 dies, destacant de la resta, juntament a 28 dies que destaca en 2 N/mm^2 . A edats llargues, 90 dies, no obté la millor resistència però és pròxima i per tant es pot assolir com a favorable. Pel que fa a l'evolució, augmenta molt més entre el període de 7 a 28 dies que no pas en el segon

En l'assaig a compressió, s'obté dues vessants diferenciades, per una banda l'arena silícica de Bellpuig i l'arena de la Vall d'Aran ja que els resultats són molt constants en les tres edats d'estudi i a la vegada molt inferiors en relació a les dues arenes restants, com són l'arena calcària d'Arbeca i l'arena del Pallars. Aquestes darreres obtenen resultats molt destacats ja sigui a 7 dies on destaca l'arena del Pallars i sobretot pel que fa a edats llargues, a partir de 28 dies, que superen a les primeres arenes esmentades en més de 8 N/mm^2 a 28 dies i en més de $13,3 \text{ N/mm}^2$ a 90 dies. Pel que fa a evolució, tant l'arena de Bellpuig com la de la Vall d'Aran tenen un increment de resistència semblant en els dos períodes, mentre que l'arena d'Arbeca i la del Pallars tenen un increment major durant el primer període que no en el segon, tot i que destaca l'arena d'Arbeca ja que el increment és 3 vegades major.

Per tant, ja sigui a flexió com a compressió l'arena del Pallars és la que reacciona més favorablement amb la calç Saint-Astier. Però cal anotar que a flexió i a 90 dies reacciona millor l'arena d'Arbeca però superant a la del Pallars mínimament.

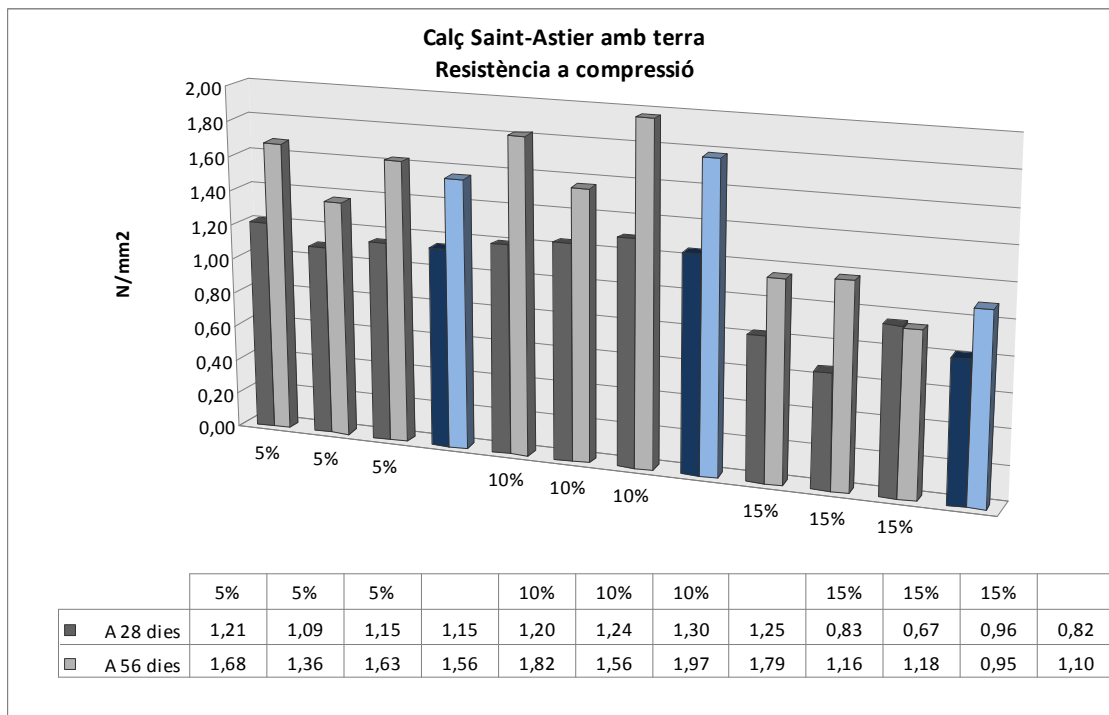
9.3.2 Formigó de calç Saint-Astier

9.3.2.1 Calç Saint-Astier amb grava



En aquest cas, s'estudien les provetes de formigó de calç Saint-Astier amb grava, com es mostra anteriorment en el gràfic. Cal destacar que la resistència amb la dosificació del 5% obté resultats molt inferiors a la resta fins al punt que el fraguat no és òptim ja que una de les provetes no va desemmotllar correctament impeding el seu assaig. La resistència assolida en 56 dies és molt inferior de la que s'assoleix al 28 dies en les dues altres dosificacions. La resta de resultats obtinguts, són similars tot i que destaca la dosificació del 10% i on a 56 dies el increment de resistència augmenta més que la resta.

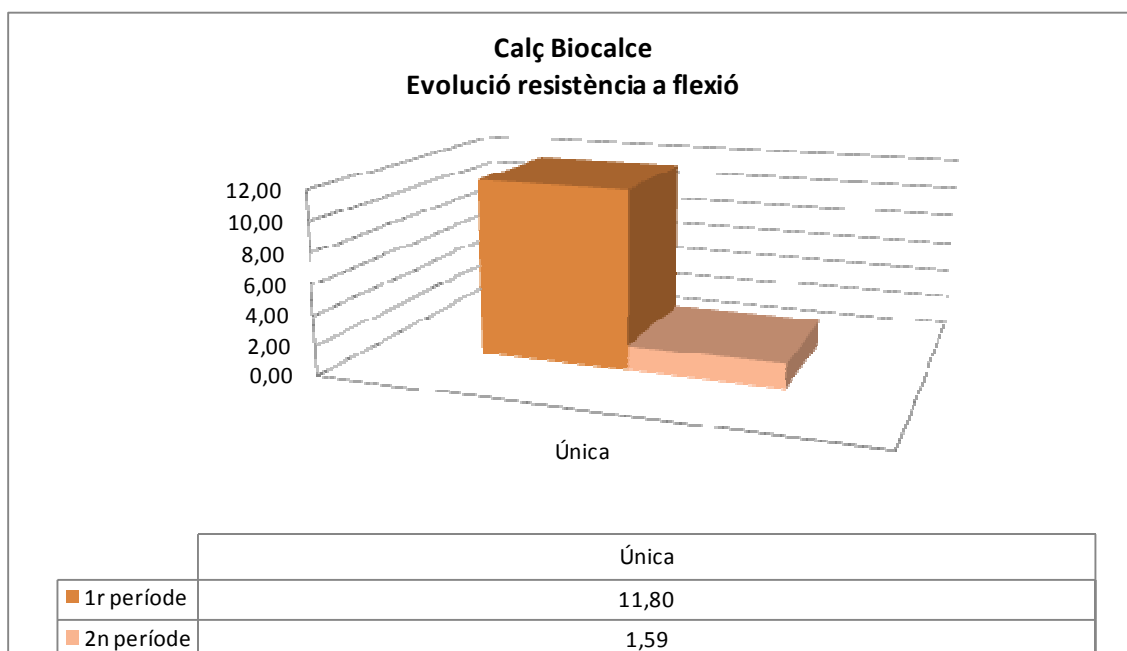
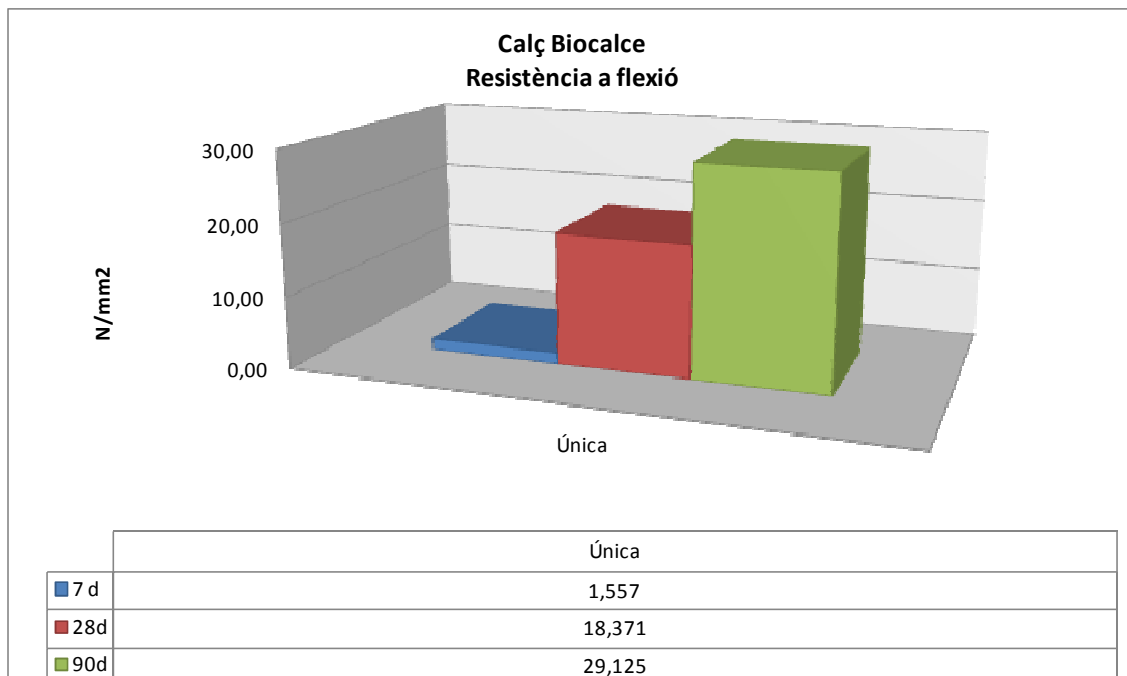
9.3.2.2 Calç Saint-Astier amb terra

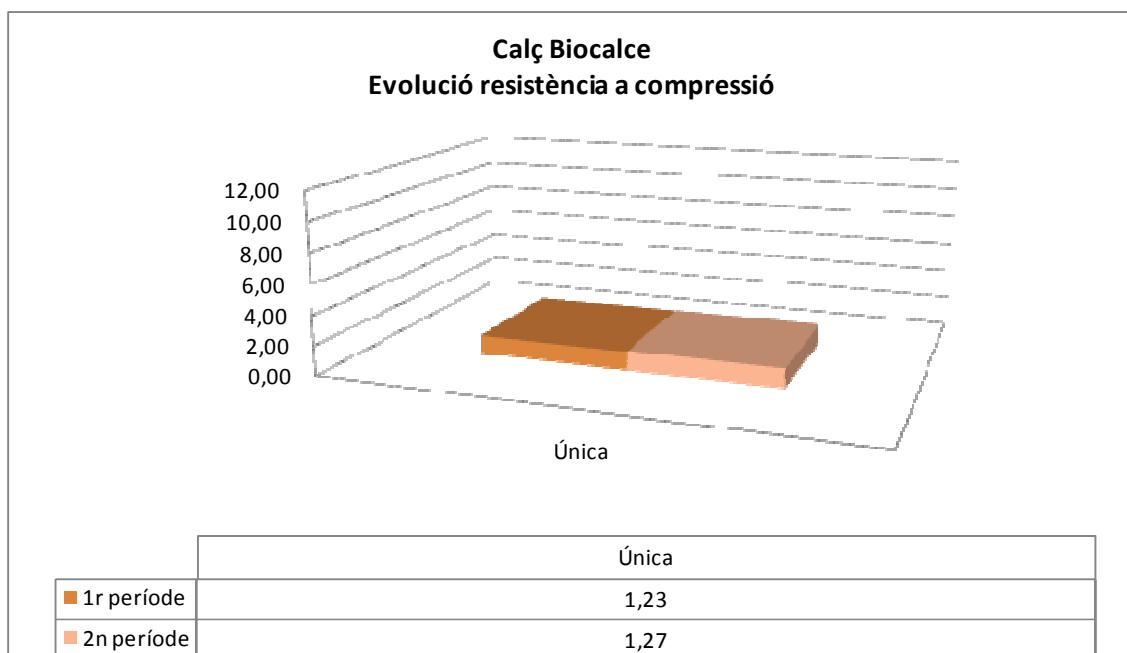
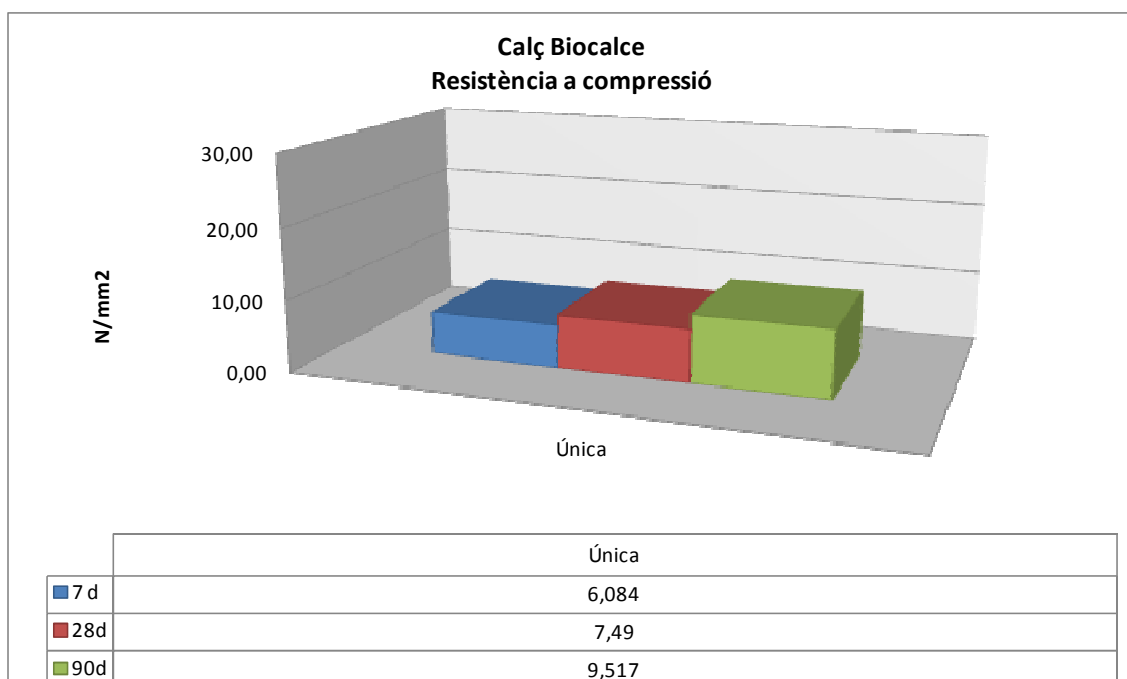


Els resultats obtinguts dels assajos amb terra, que es mostren en el gràfic anterior, mostra una millora en el formigó pel que fa a resistència ja que augmenta en comparació amb grava. Destaca la dosificació del 10% però tenint valors propers la dosificació del 5%, sobretot pel que fa a 28 dies i en certa mesura als 56 dies. La resistència a 56 dies del 15% és menor al que assoleix qualsevol de les altres dues dosificacions als 28 dies, per tant, aquesta dosificació no assoleix resultats comparables.

9.4 Calce Biocalce

9.4.1 Morter de calç Biocalce





La calç Biocalce assajada no s'ha comparat amb diferents tipus d'arena ja que en la seva composició ja en tenia, juntament amb altres components. En qualsevol cas, els resultats obtinguts són incomparables amb les altres provetes de morter de calç ja que els seus valors són desmesuradament superiors, degut a la seva composició.

En l'assaig a flexió, s'obté valors molt elevats que no pas a compressió i on es pot observar que la seva evolució en el temps augmenta d'una manera important, ja que a 7 dies no arriba a 2 N/mm²

però a 28 dies ja supera els 18 N/mm^2 i, obté gairebé 30 N/mm^2 a 90 dies. Per tant, el increment de resistència és més significatiu de 7 a 28 dies que no pas de 28 a 90 dies.

En l'assaig a compressió, els valors són superiors a la resta de provetes de morter de calç anteriorment assajades ja que a 7 dies ja supera els 6 N/mm^2 fins arribar a superar els $9,5 \text{ N/mm}^2$ a 90 dies. En aquest cas, l'evolució de les provetes de Biocalce es manté constant en els dos períodes.

9.5 Discussió dels resultats

Inicialment es van realitzar els assajos de morter amb la dosificació descrita en el corresponent apartat i posteriorment es va voler realitzar assajos de formigó de calç amb dosificacions diferents per tal d'assolir la dosificació òptima.

Tenint en compte les densitats aparents de les diferents calç citades anteriorment, juntament amb les propietats de cada calç obtingudes de les fitxes tècniques adjuntades als annexos i les propietats de cada tipologia d'àrid, també als annexos, es poden comparar els resultats obtinguts en les dues vessants: morter i formigó de calç.

9.5.1 Comparatiu de morter de calç

La densitat de les tres tipologies de calç són diferents, i per tant, implica una quantitat diferent en volum en les barreges emprades per a les provetes, pel que fa a calç. Aquest detall influeix en la barreja del morter per un costat en la quantitat d'aigua emprada, ja que a mes densitat, hi ha menys calç en volum i per tant la barreja pot mostrar més presència d'aigua i no semblar tant seca comparat amb la resta.

Pel que fa a la calç Pascual, l'arena més adient pel que fa a resistència a flexió es correspon a l'arena calcària d'Arbeca. L'evolució en les tres edats estudiades ha estat: $1,594 \text{ N/mm}^2 - 3,141 \text{ N/mm}^2 - 3,398 \text{ N/mm}^2$. Per la calç Pachs, ha estat l'arena del Pallars amb $0,984 \text{ N/mm}^2 - 3,407 \text{ N/mm}^2$ en les edats de 7 i 28 dies, respectivament, mentre que a 90 dies és l'arena d'Arbeca amb $6,203 \text{ N/mm}^2$ tot i que l'arena del Pallars es troba a $6,14 \text{ N/mm}^2$. Per últim, la calç francesa Saint-Astier obté els resultats igual que la calç Pachs, ja que obté $1,508 \text{ N/mm}^2 - 4,098 \text{ N/mm}^2$ a 7 i 28 dies, mentre que a 90 dies és l'arena calcària d'Arbeca la que obté major resistència amb $7,445 \text{ N/mm}^2$ tot i que l'arena del Pallars es situa a $7,055 \text{ N/mm}^2$.

Amb aquesta dosificació emprada es mostra una davallada de resistència amb calç aèries, com la calç Pachs, a diferència a la calç hidràulica com la Pascual o Saint-Astier, pel que fa a edats curtes. Una vegada es passa al mes de fraguat, la calç aèria augmenta la seva resistència fins igualar-se pràcticament a la calç hidràulica, fins i tot, a 90 dies pot arribar a superar la resistència a la calç Pascual al doble.

Pel que fa a compressió, la comparació de resistència es situa en la mateixa línia que en flexió, ja que la calç àeria a edats curtes no mostra bona resistència amb aquesta dosificació, però a mesura que es deixa més temps per endurir, la resistència augmenta, però en aquest cas, no assoleix resistències similars a una calç hidràulica, i sempre tenint en compte la dosificació emprada. Per exemple, el que la calç àeria estudiada assoleix en 28 dies, és el que assoleix pràcticament a 7 dies una calç hidràulica; i la resistència a 90 dies de la calç àeria és el que assoleix una calç hidràulica estudiada a 28 dies amb un tipus d'arena calcària.

Per altra banda, cal destacar tant a flexió com a compressió la resistència assolida per la calç Biocalce, ja que a flexió supera amb molta diferència la resistència a flexió d'una calç àeria o hidràulica, fins al punt d'arribar a gairebé 30 N/mm^2 , mentre que a compressió arriba als $9,5 \text{ N/mm}^2$, supera en gairebé 2 N/mm^2 la major resistència màxima de la calç hidràulica assolida per la calç Saint-Astier en la mateixa edat.

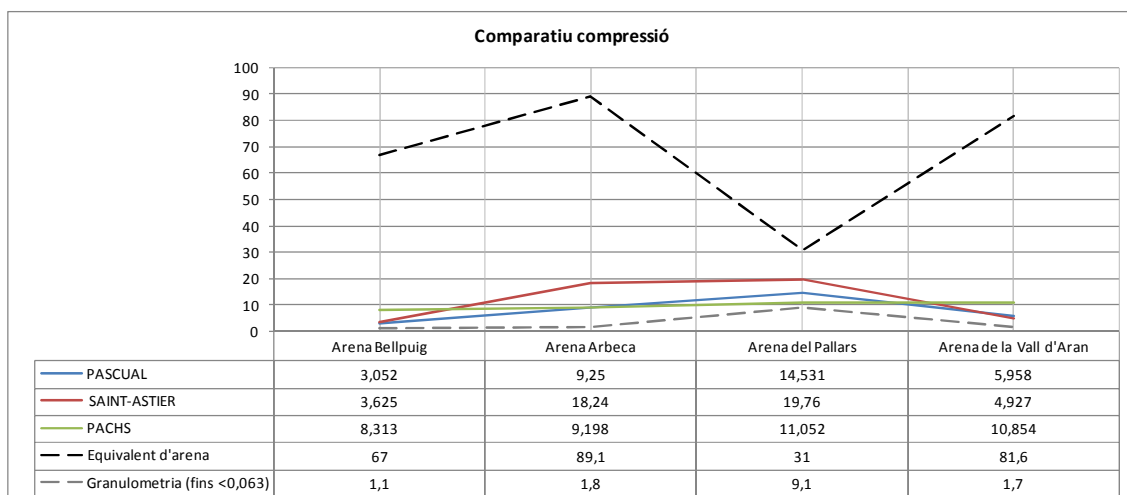
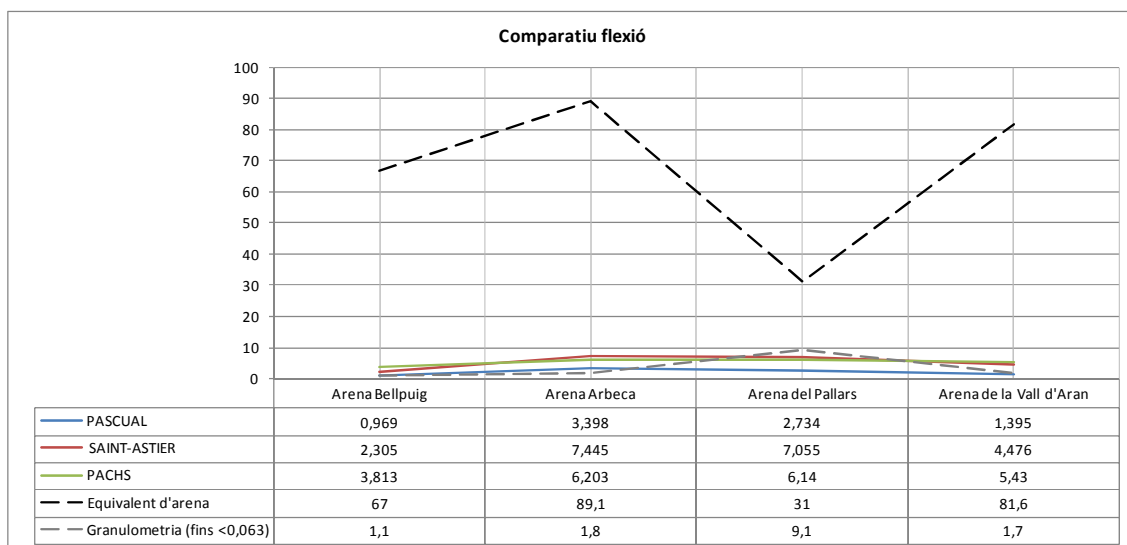
Per un altre costat, i tenint en compte altres característiques dels àrids estudiats com són l'equivalent d'arena i la granulometria, es pot dir que a major dispersió en granulometria posseint diferents tamisos en la composició de l'arena, i a la vegada tenir un menor equivalent d'arena, els resultats són més favorables i s'obté una resistència major, a diferència de si aquestes dues característiques són inverses. En aquest darrer cas la resistència disminueix.

Per altra banda, la tipologia de la calç s'ha de tenir en compte ja que la calç hidràulica obté resistències més elevades, tot i que no en totes les tipologies d'àrid. Però com s'ha descrit anteriorment en el corresponent apartat, la calç Pascual la determinen com una calç hidràulica però no es detalla concretament la seva tipologia, mentre que la calç Saint-Astier es detalla que és una calç hidràulica natural pura NHL5, pel que es pot afirmar que la d'origen francès és més pura que no pas la Pascual degut als resultats obtinguts. Una calç hidràulica obté resistències molt més òptimes, però en qualsevol cas, són millors quan més pura sigui la calç, com és el cas de la calç Saint-Astier. Una calç NHL 5 natural és la més pura respecte les calçs càlciques, dolomítiques i hidràuliques ja que no conté addicions i d'aquesta manera el seu contingut de calç és major respecte a les altres calçs amb addicions. Les calçs hidràuliques naturals no tenen cap tipus d'additiu y posseeixen més resistència respecte a una calç àeria. La resistència s'obté de la combinació de sílice que es produeix durant el procés de cocció de la calç, mentre que les calçs hidràuliques no naturals ho aconsegueixen per l'addició d'elements putzolànics durant el procés d'enduriment. Per tant, tenint en compte el citat anteriorment, la calç hidràulica és comporta millor si tenim en compte que a major granulometria i menor equivalent d'arena s'obtenen valors més favorables, mentre que a la inversa aquestes resistències es redueixen. Pel que fa a la calç àeria, l'origen de l'àrid no influeix en gran mesura a la resistència a compressió, si es tracta de les condicions estudiades de dosificació, però de qualsevol manera, la resistència major s'obté en les

condicions de major granulometria i menor equivalent d'arena igual que amb la calç hidràulica i també a major temps de fraguat.

La raó per la que l'arena de Bellpuig obté uns resultats menors que la resta d'arenes és el seu origen, ja que es tracta d'una arena silícica tenint una granulometria unificada pràcticament de tamís molt petit. En aquest cas, sembla que la calç aèria reacciona millor que qualsevol calç hidràulica. El mateix succeeix amb l'arena de la Vall d'Aran, però en aquest cas el tamís granulomètric més major en tota la quantitat.

Per tant, les dues tipologies d'arenes restants, la calcària d'Arbeca i la del Pallars, tenen una granulometria més dispersa i per tant la cohesió dels diferents fins amb la calç és més favorable mostrant resultats més favorables, tot i que, per la seva formació l'arena del Pallars és la que obté les majors resistències. Això fa referència als fins que passa pel garbel 0,063, essent d'un 10% aproximat a diferència de la resta que són pràcticament 2%, per tant, no hi ha tants fins en comparació a la del Pallars.

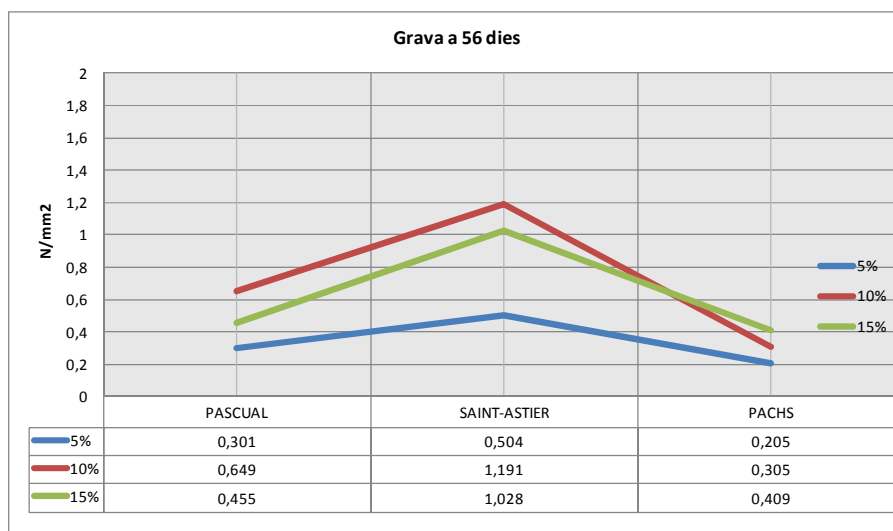
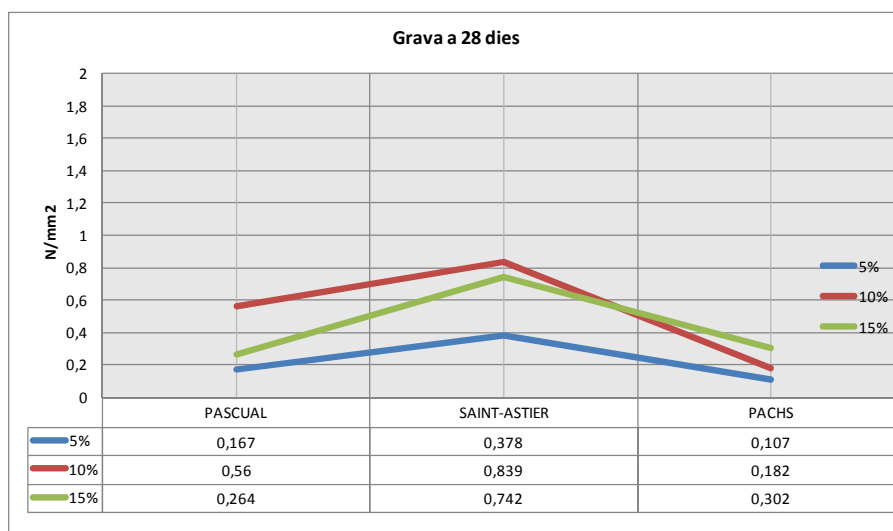


9.5.2 Comparatiu de formigó de calç

El formigó estudiat s'ha analitzat a partir de dos tipologies d'àrid i en tres tipus de dosificacions per a cada tipus d'àrid.

Pel que fa al formigó amb grava, la calç estudiada en cada cas mostra valor similars pel que fa a la dosificació òptima. Tant per la calç Pascual com la calç Saint-Astier, totes dues hidràuliques, la major resistència s'obté en el 10%. A 28 dies la resistència assolida oscil·la entre $0,56 \text{ N/mm}^2$ – $0,39 \text{ N/mm}^2$ de mitjana, mentre que a 56 dies augmenta en $0,1 \text{ N/mm}^2$ per la calç Pascual i en $0,3 \text{ N/mm}^2$ per la calç Saint-Astier. El percentatge al 5% no proporciona resultats òptims fins al punt que el temps de fraguat és més lent ja que en ocasions la proveta en el moment de desemmotllat dona problemes i es trenca, en qualsevol dels dos casos de la calç hidràulica. En el cas de la calç Pascual, el 15% obté resultats pròxims a la meitat de la resistència assolida al 10% mentre que en el cas de la calç francesa, els resultats de dosificació en el 15% són pròxims i similars que a la resistència òptima assolida al 10%. De qualsevol manera, la calç francesa assoleix major resistència pel mateix fet anteriorment explicat referent a la seva puresa, ja que al ser una calç NHL5 és la més pura respecte aquelles que són càlciques, dolomítiques i hidràuliques perquè no conté addicions i el seu percentatge és més elevat respecte a les que tenen addicions. Així, la resistència assolida a 56 dies de la calç Pascual és inferior de la resistència que a 28 dies obté una proveta de calç francesa.

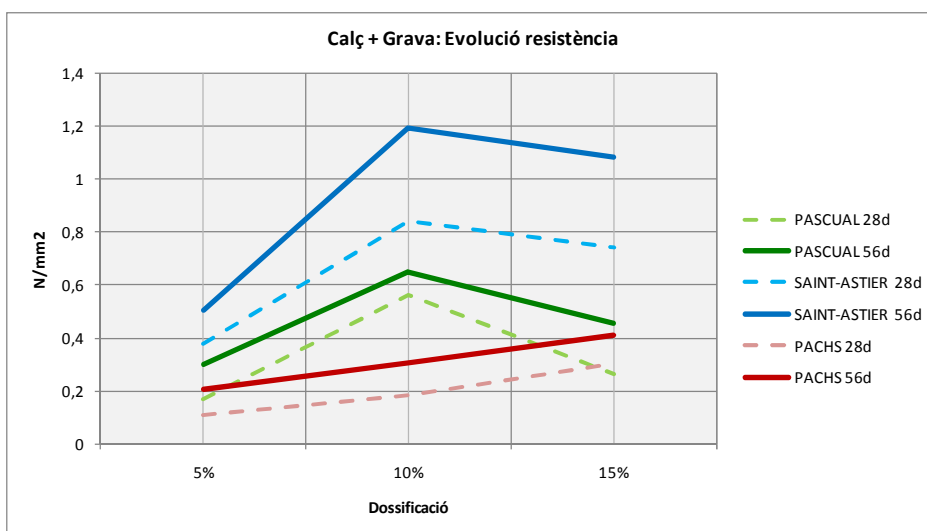
Per altra banda, la calç Pachs obté resultats a no tenir en compte en les condicions estudiades de dosificació i edat, però si es tenen en compte els resultats, el 15% es correspondria en un punt més adient que la resta. Una vegada desemmotllades les provetes, com a mínim 1 de cada 3, s'han trencat ja que el fraguat no era el esperat. A més, els resultats obtinguts són la meitat aproximadament del assolit per una proveta hidràulica. Per aquesta raó, els resultats obtinguts no es poden tenir en compte. S'ha de tenir en compte que la tipologia de calç és diferent i per tant, les condicions estudiades no sembla obtenir un resultat òptim en calç aèria a diferència a una calç hidràulica. En la primera fase de la fabricació de provetes cúbiques de formigó amb calç Pachs no van acabar d'endurir satisfactòriament. En primera instància es pensava que era degut a les baixes temperatures que disposava el local d'emmagatzematge, però una vegada revisada la fitxa tècnica de totes les calçs emprades es va observar la manca, pràcticament, de silicats en la calç Pachs en relació amb la resta, essent del 0,8% contra un 12%.



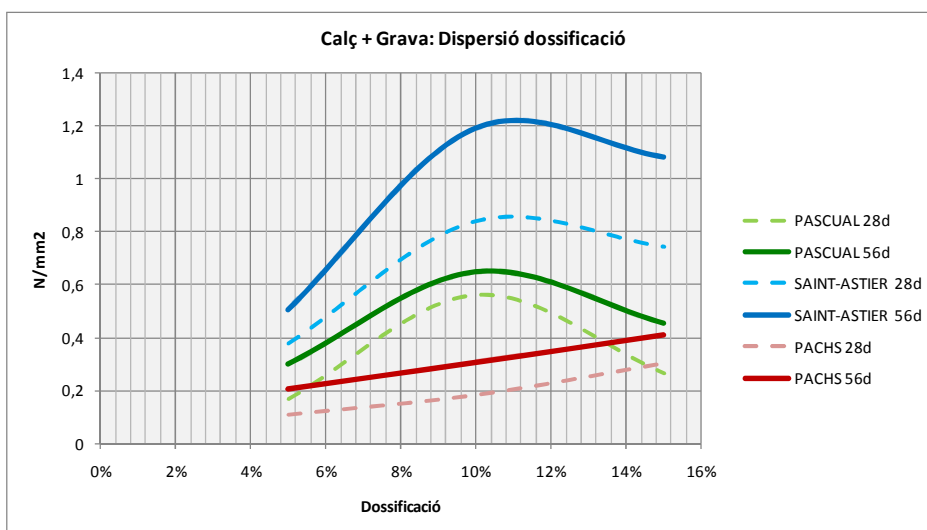
En els gràfics anteriors, es detallen els resultats obtinguts a 28 i 56 dies per cada tipus de calç i en els tres tipus de dosificació estudiada. En tots dos gràfics, la calç Saint-Astier obté els resultats òptims i la dosificació òptima es correspon al 10%, com ja s'ha descrit anteriorment.

Pel que fa a la calç hidràulica, els resultats que s'han obtingut mostren un pic en dos de les tres dosificacions estudiades, per tant es pot obtenir una dosificació òptima, mentre que amb la calç aèria, no s'ha produït aquest fet. En això es podria deduir que no s'ha obtingut la dosificació òptima, i que per tant, de les estudiades, cap d'elles es correspon amb la dosificació adient per aquest tipus de calç aèria i s'hauria de estudiar dosificacions majors al 15%, segons mostra el gràfic.

El gràfic següent mostra l'evolució de cada calç en les dosificacions estudiades i els corresponents pics de resistència corresponents a l'òptima dosificació que arribat en aquell punt torna a caure.



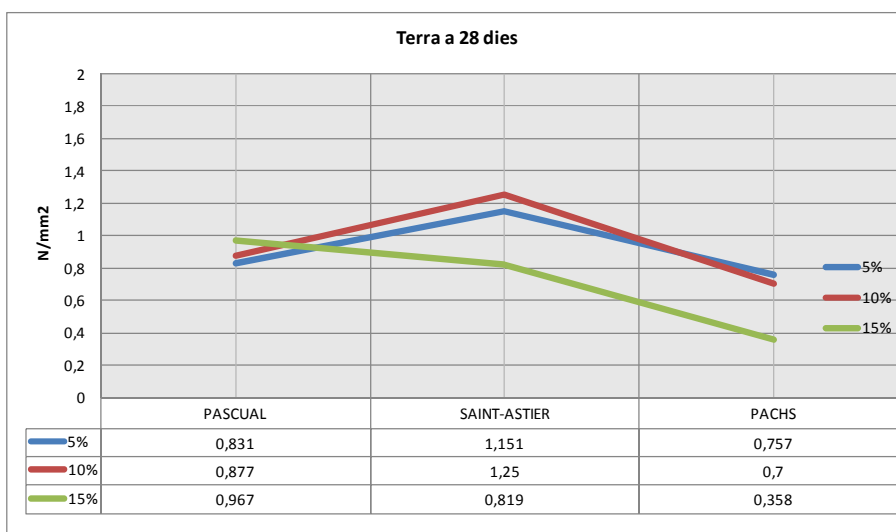
Les tres dosificacions estudiades mostren la resistència en dit punt però, com es mostra en el gràfic de sota, es pot realitzar la dispersió de les rectes per tenir una idea de la dosificació òptima. En aquest cas es mostra, que la calç Saint-Astier obtindria una dosificació òptima sobre el 11%, la calç Pascual sobre el 10% i la calç Pachs no mostra el pic òptim ja que continuaria augmentant la seva resistència si s'augmenta la dosificació.

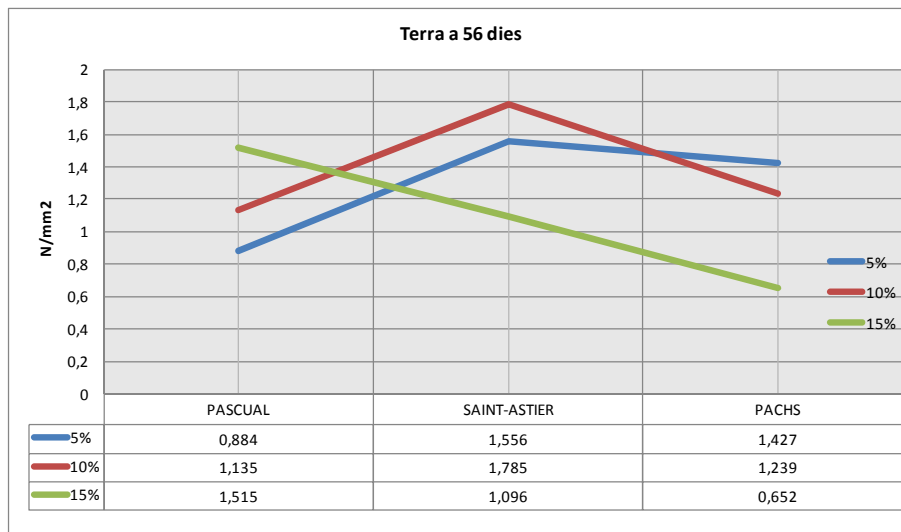


Les provetes de formigó amb terra, a diferència a les provetes amb grava, mostraven resultats molt diversos entre les diferents tipologies de conglomerat estudiat. Per una banda, la calç hidràulica proporcionava resultats diferents, aquest cop, entre la calç Pascual i Saint-Astier. La calç valenciana Pascual assoleix resultats molt semblants a 28 dies entre les tres dosificacions i en una ocasió, al 5%, i també pràcticament és la resultant de 56 dies. Per la resta, a 56 dies la resistència augmenta en 0,3 o 0,5 N/mm^2 depenent de la dosificació. Per tant, les resistències assolides al 5% són similars entre si a les dues edats d'estudi. Aquest augment de resistència és més important al 15% on el salt és major. A més,

és amb el 15% on la resistència és l'òptima per la calç Pascual. Els resultats mostren que la resistència a 28 dies del 15% és major a la resistència adquirida als 56 dies del 5%. Per la seva part, la calç Saint-Astier, tot i que assoleix resistència similar entre el 5% i el 10% de dosificació, es supera en el 10% per 0,1 N/mm² a 28 dies i 0,2 N/mm² a 56 dies. En aquest cas, la major dosificació, del 15%, obté una resistència menor fins al punt que la resistència a 56 dies no arriba a ser el que qualsevol de les dues dosificacions restants assoleix en 28 dies. Pel que fa a la calç Pachs, la dispersió de valors és important degut a resultats molt inferiors a la resta, corresponent a la dosificació del 15% tot i que a 56 duplica la seva resistència. Mentre que en el cas de la calç àeria la dosificació òptima es troba en el 5%. Els valors obtinguts pel 5% són pròxims als del 10% pel que fa a 28 dies mentre que a 56 dies supera en 0,2 N/mm² la dosificació del 5%. En canvi, la dosificació del 15% obté resultats molt inferiors, fins al punt que a 56 dies la resistència assolida no arriba a la que s'obté a 28 dies en qualsevol de les dues dosificacions restants. Per altra banda, la resistència de 28 a 56 dies es duplica en els tres casos.

Per tant, doncs, segons la tipologia de calç i les condicions estudiades, la resistència és diferent: per una calç àeria la dosificació òptima es troba en el 5%, per una calç hidràulica com la Pascual es troba en el 15% mentre que per una calç hidràulica més pura es troba en el 10%, tenint en compte les condicions estudiades. Però, en qualsevol cas, tenint en compte els resultats més favorables, la calç Pachs i la calç Pascual obtenen unes resistència aproximadament iguals, tret que a 28 dies és superior en 0,2 N/mm² la Pascual a la Pachs i en 0,1 N/mm² a 56 dies. En canvi, la calç Saint-Astier obté resistències més elevades sobretot a 28 dies, ja que les supera en 0,3 – 0,5 N/mm² i a 56 els resultats són majors però no aconsegueix tanta diferència. Per tant, es repeteix el esmentat anteriorment sobre l'origen de la calç en aquestes condicions, i es que a major puresa major resistència. Pel que fa a la calç àeria també s'observa la manca pràcticament de silicats en la seva composició i per tant el que afecta aquest element en la resistència respecte a una calç hidràulica.

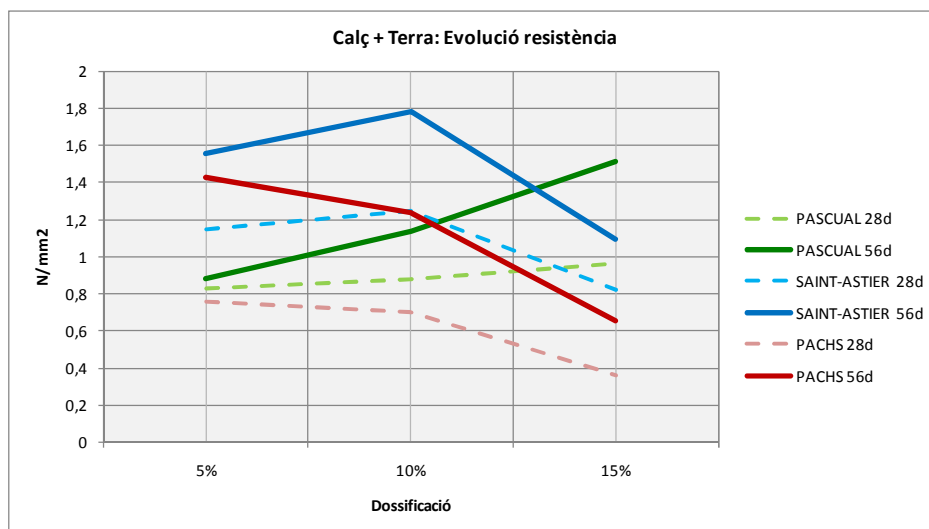




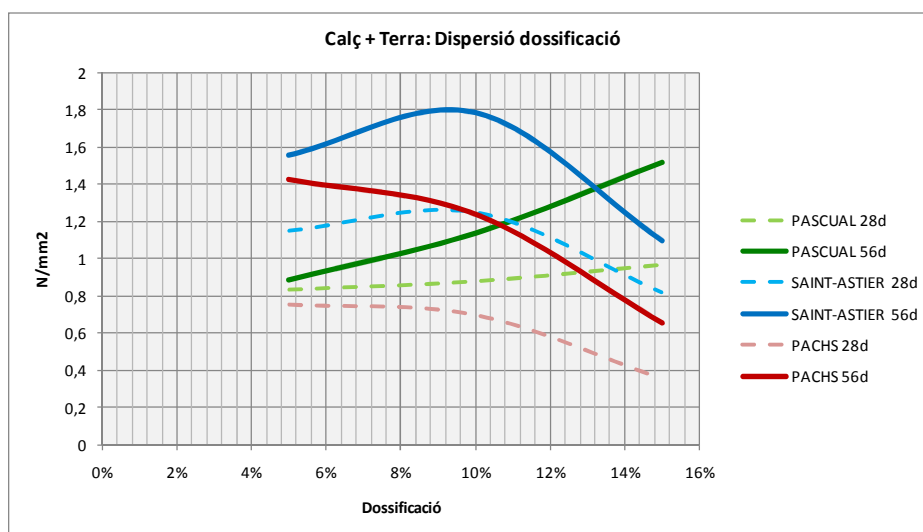
En els gràfics anteriors, es detallen els resultats obtinguts a 28 i 56 dies per cada tipus de calç i en els tres tipus de dosificació estudiada. En els dos gràfics, la calç Saint-Astier obté els resultats òptims pel que fa al 5% i 10% de dosificació, però la dosificació òptima es correspon al 10%, com ja s'ha descrit anteriorment. Però en canvi, per la calç Pascual els resultats òptims es corresponen al 15% de dosificació però en qualsevol cas amb una resistència inferior a la màxima assolida amb totes les provetes de terra a 28 i 56 dies.

Els resultats obtinguts situen un pic en una de les tres dosificacions estudiades, per tant es pot obtenir una dosificació òptima pel que fa a la calç hidràulica pura Saint-Astier, mentre que amb la calç aèria Pachés i la calç hidràulica Pascual, no es produeix aquest fet. Com anteriorment també s'ha esmentat, es podria deduir que no s'ha obtingut la dosificació òptima, i que per tant, de les estudiades, cap d'elles es correspon amb la dosificació adient per aquest tipus de calç i s'hauria de estudiar dosificacions menors al 5% per la calç Pachés i superior al 15% per la calç Pascual, segons mostra el gràfic.

El gràfic següent mostra l'evolució de cada calç en les dosificacions estudiades i els corresponents pics de resistència corresponents a l'òptima dosificació que arribat en aquell punt torna a caure o en aquest cas també la manca d'aquest pic que ens dona la informació de la dosificació òptima.

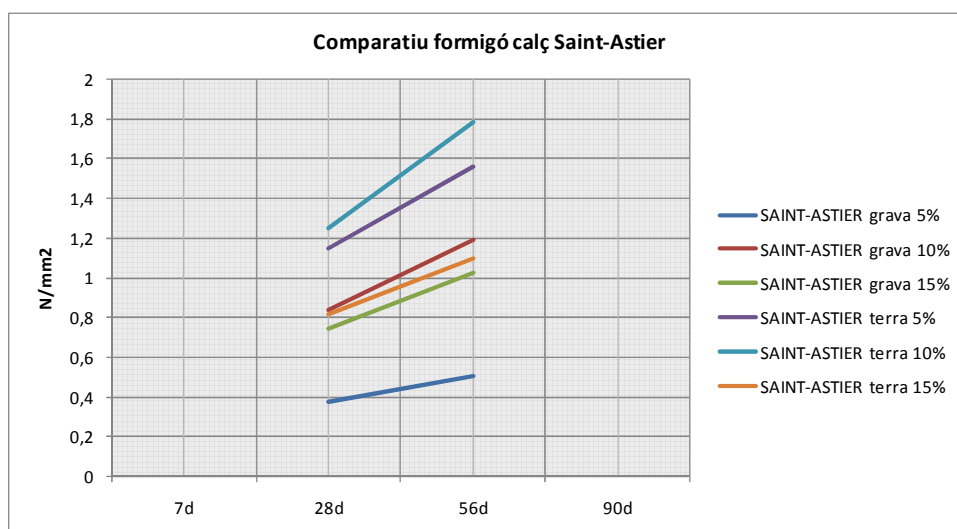
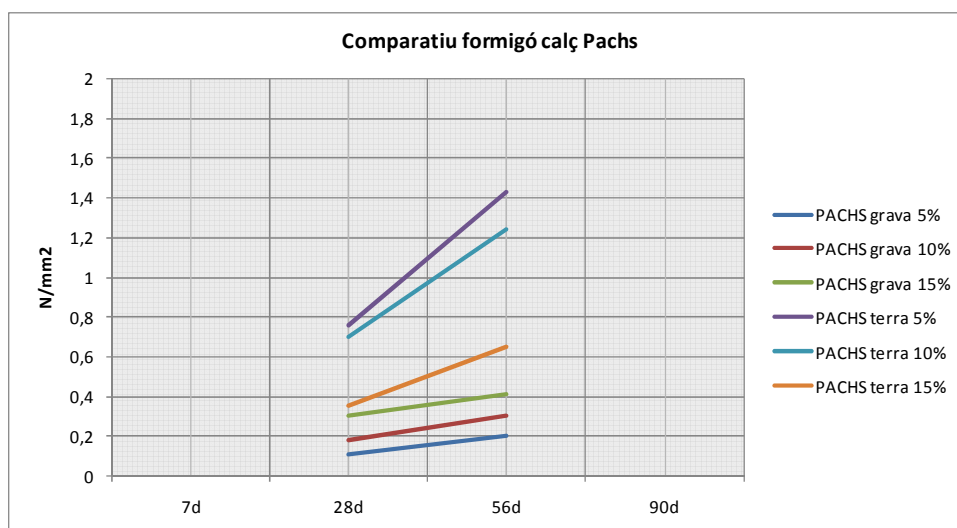
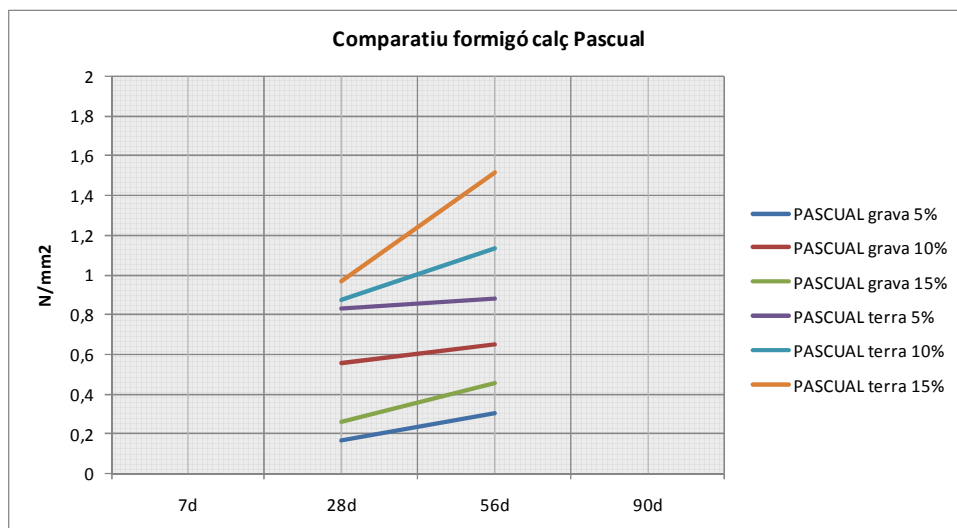


Les tres dosificacions estudiades mostren la resistència en dit punt però, com es mostra en el gràfic de sota, es pot realitzar la dispersió de les rectes per tenir una idea de la dosificació òptima. En aquest cas es mostra que la calç Saint-Astier obtindria una dosificació òptima sobre el 9% però tant la calç Pascual com la calç Pachs no mostra el pic òptim ja que continuaria augmentant la seva resistència, si s'augmenta la dosificació, en el cas de la Pascual o, si es disminueix, en el cas de la Pachs.



Com a taules resum de totes les dades discutides en dit apartat hi ha tres gràfics resum on es mostren totes les tipologies de provetes assajades, ja sigui de grava o terra i en les tres dosificacions estudiades. En aquests gràfics s'observa que la calç Pachs obté major resistència amb terra en el 5%, però en qualsevol cas amb una resistència inferior al valor òptim de la calç Pascual amb terra en el 15%, i aquest darrer és inferior a la calç Saint-Astier amb terra en el 10%. La calç francesa Saint-Astier obté resultats superiors a la resta sobretot amb el 10% de terra però també amb 5%.

Aquest fet demostra la importància de l'origen de la calç, la dosificació, l'àrid emprat i les condicions estudiades, ja que una calç hidràulica NHL5 aconsegueix resistència molt elevades amb diferència.



10. CONCLUSIONS

La calç és un conglomerant que actualment no s'utilitza de la manera que antigament es feia, però que en qualsevol cas és necessari tornar a utilitzar per tasques de restauració i bioconstrucció.

Per tant, i tenint en compte els resultats obtinguts després d'un llarg anàlisi per mitjà d'assajos de provetes i un acurat estudi de les propietats de tots els materials per tal de poder treure diferències acceptables s'ha arribat a 2 conclusions importants:

1. L'origen de la calç és un factor important, com en les condicions en les que es treballa. Una calç aèria dona resultats poc favorables a edats curtes, mentre que a llargues és un bon conglomerant. Una calç hidràulica, en canvi, obté resistències molt més òptimes, però en qualsevol cas, són millors quan més pura sigui la calç, com la calç Saint-Astier. Una calç NHL 5 natural és la més pura respecte les calçs càlciques, dolomítiques i hidràuliques ja que no conté addicions i així el seu contingut de calç és superior respecte a les altres calçs hidràuliques amb addicions. Les calçs hidràuliques naturals no tenen cap tipus d'additiu y posseeixen més resistència respecte a una calç aèria. La resistència s'obté de la combinació de sílice que es produeix durant el procés de cocció de la calç, mentre que les calçs hidràuliques no naturals ho aconsegueix per l'addició d'elements putzolànics durant el procés d'enduriment. L'element tingut en compte ha estat el silicat (SiO_2) contingut en cada calç, essent major en calç Pascual i Saint-Astier en el grau del 12%, mentre que en la calç Pachs forma un 0,8% del total. Cal recordar, que els silicats són els elements que donen pes al material i per tant aquest factor, a més a més, està relacionat amb la quantitat de calç obtinguda en la barreja.
2. L'origen de l'àrid a emprar és important, ja que la calç no es comporta com el ciment i per tant, necessita una major dispersió granulomètrica en l'àrid per tal de que els fins produeixin cohesió entre els materials que formen part del morter o del formigó, com s'ha comprovat en els assajos amb una arena procedent del Pallars i una terra amb molta quantitat de fins. Aquest efecte també es vol obtenir amb un ciment però les característiques serien diferents. Un àrid net, un tot u comercial, no permet una unificació perfecta amb la calç perquè a aquesta barreja li manquen els fins. S'ha de tenir el percentatge d'àrid que passa pel garbell 0,063 ja que mostra la quantitat de fins en l'arena. A major quantitat, l'àrid serà més brut i proporcionarà major unió entre tots els elements de la barreja. En qualsevol cas, si és necessari emprar un àrid tot u hauria de disposar fins en la granulometria o, almenys, ser un àrid rodat brut. Les arenes de granulometria fina necessiten més quantitat d'aigua degut a que la superfície a humitejar és més elevada. Una alta proporció de grans massa fins dona lloc a un alt contingut d'aigua en el morter o formigó, pel que provocarà conseqüències negatives en la resistència a flexió i compressió. Per exemple, una bona i ben graduada arena gruixuda i forta és necessària per un estucat, en canvi, l'arena fina, pot ser escollida



per la capa d'acabat i donar color. Per tant, depenent de la intervenció que es vol aconseguir, s'utilitzarà un tipus o un altre d'arena o àrid.

En qualsevol cas, sempre és convenient fer un estudi dels elements que es volen utilitzar per la intervenció que es vol realitzar, ja que tant la calç com l'àrid és important, però també la dosificació perquè es pot passar d'una resistència òptima a una dolenta amb molta facilitat. Per tant, doncs, cal un pas previ a la intervenció per tal de realitzar un estudi de les condicions que haurà, els medis emprats i el temps, per tal de poder escollir detingudament els elements adients.



11. REFERENCIES BIBLIOGRÀFIQUES

11.1 General

1. Alexandre Sanchez, Francisco Javier. "História, caracterización y restauración de morteros". Universidad de Sevilla, 2002.
2. Arcos Molina, Juan: "Materiales básicos de la Construcción". ProgenSA (Promotora General de Estudios S.A), Sevilla, 1995.
3. Argano, Sònia i Guixeras, Montserrat: "Materials de construcció tradicionals: La calç, propietats i aplicacions en restauració i obra nova". Barcelona, 2009.
4. Garate Rojas, Ignacio: "Artes de la cal". Editorial Munillalera, Madrid, 2002.
5. García, Oriol; Martín, Mónica i Azconegui, Francisco: "Guía Práctica de la Cal y el Estuco". Editorial de los oficios, León, 1999.
6. Matteini, Mauro i Moles, Arcangelo. "La química en la restauración. Los materiales del arte pictórico". Editorial Nerea, S.A., 2008.
7. Rodríguez-Mora, Oscar: "Morteros. Guía General". Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero (AFAM), Madrid, 2003.
8. Rosell, Jaume i Subirats, Miquel: "La producción de la calç, ahir. El procés preindustrial de producció de calç a la comarca del Montsià". Col·legi Oficial d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona, 1987.
9. Varios Autores: "Nueva enciclopedia del Encargado de Obras. Vol 2. Materiales de construcción". Ediciones CEAC, Barcelona, 2003.

11.2 Normativa

1. **UNE EN 196:** Métodos de ensayo de cementos
 - a. UNE EN 196 – 1: Determinación de resistencias mecánicas.
 - b. UNE EN 196 – 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen.
2. **UNE EN 459:** Cales para la construcción
 - a. UNE EN 459 – 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.
 - b. UNE EN 459 – 2: Métodos de ensayo.
3. **UNE EN 933:** Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.
 - a. UNE EN 933 – 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Métodos del tamizado.
 - b. UNE EN 933 – 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.
 - c. UNE EN 933 – 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena.



- d. UNE EN 933 – 9: Evaluación de los finos. Ensayo de azul de metileno.
- 4. **UNE EN 1097:** Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.
 - a. UNE EN 1097 – 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.
- 5. **UNE EN 1744:** Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos.
 - a. UNE EN 1744 – 1: Análisis químico.
- 6. **UNE EN 12350:** Ensayos de hormigón fresco
 - a. UNE EN 12350 – 2: Ensayo de asentamiento.
- 7. **UNE EN 12390:** Ensayos de hormigón endurecido
 - a. UNE EN 12390 – 1: Forma, medidas y otras características de las probetas y moldes.
 - b. UNE EN 12390 – 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.
 - c. UNE EN 12390 – 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.

11.3 Recursos informàtics

1. **ANCADE (Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España).**
<http://www.ancade.com/>
2. **Biocalce.** <http://division.biocalce.it/>
3. **Cales Pascual.** <http://www.calespascual.com/>
4. **Calç Pachs.** <http://www.calespachs.com/>
5. **Chaux Saint-Astier.** <http://www.c-e-s-a.fr/>
6. **Wikipedia. “Mortero de cal”.** http://es.wikipedia.org/wiki/Mortero_de_cal



12. ÀNEX 1

12.1 Fitxa tècnica: Calç Pascual

En aquest annex s'adjunta la fitxa tècnica del producte de la calç Pascual.



13. ÀNEX 2

13.1 Fitxa tècnica: Calç Pachs

En aquest annex s'adjunta la fitxa tècnica del producte de la calç Pachs.



14. ÀNEX 3

14.1 Fitxa tècnica: Caux Saint Astier

En aquest annex s'adjunta la fitxa tècnica del producte de la calç hidràulica de St.Astier.



15. ÀNEX 4

15.1 Fitxa tècnica: BioCalce

En aquest annex s'adjunta la fitxa tècnica del producte de la calç BioCalce.



16. ÀNEX 5

16.1 Fitxa tècnica: Arena natural silícica de Bellpuig

En aquest annex s'adjunta la fitxa tècnica del producte, les propietats de l'arena natural silícica de Bellpuig.



17. ÀNEX 6

17.1 Fitxa tècnica: Arena artificial de matxucat de roques calcàries d'Arbeca

En aquest annex s'adjunta la fitxa tècnica del producte, les propietats de l'arena artificial de matxucat de roques calcàries d'Arbeca.



18. ÀNEX 7

18.1 Fitxa tècnica: Arena procedent del Pallars

En aquest annex s'adjunta la fitxa tècnica del producte, les propietats de l'arena procedent del Pallars.



19. ÀNEX 8

19.1 Fitxa tècnica: Arena procedent de la Vall d'Aran

En aquest annex s'adjunta la fitxa tècnica del producte, les propietats de l'arena procedent de la Vall d'Aran.